

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

CARACTÉRISATION STRATIGRAPHIQUE et GÉOCHIMIQUE DE L'OPHIOLITE DU
LAC-BROMPTON, APPALACHES DU SUD DU QUÉBEC

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

PAR
STÉPHANE DE SOUZA

MAI 2007

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier ma collègue, Caroline Daoust, pour sa bonne humeur et son dynamisme lors de notre travail d'équipe. Je suis également grandement reconnaissant envers mon directeur de recherche, Alain Tremblay, que je remercie pour sa patience et son intérêt marqué pour mon projet de recherche. La réussite de ma maîtrise n'aurait pas été possible sans le support de mes parents, ainsi que de Prunelle, ma conjointe. J'aimerais également remercier mon codirecteur, Michel Gauthier et Sébastien Castonguay, Jean H. Bédard et Gilles Ruffet, qui ont participé à des excursions dans la région du lac Brompton.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES ANNEXES.....	x
LISTE DES APPENDICES	xi
RÉSUMÉ	xii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE.....	3
1.1 Problématique et objectifs.....	3
1.2 Méthodologie	6
1.2.1 Cartographie géologique.....	6
1.2.2 Géochimie.....	7
1.2.3 Chimie minérale.....	7
1.3 Contribution des coauteurs du manuscrit du chapitre II.....	7
CHAPITRE II	
STRATIGRAPHY AND GEOCHEMISTRY OF THE LAC-BROMPTON OPHIOLITE, CANADA : EVIDENCE FOR EXTENSIVE FOREARC MAGMATISM AND MANTLE EXHUMATION IN THE SOUTHERN QUÉBEC OPHIOLITE BELT.....	9
Abstract.....	10
2.1 Introduction.....	11
2.2 Geological setting.....	12
2.3 The Lac-Brompton ophiolite.....	17
2.4 Petrography and field characteristics	19
2.4.1 Mantle peridotites	19
2.4.2 Crustal rocks	20
2.4.2.1 Pyroxenites, gabbros and diorites.....	20
2.4.2.2 Granitoids.....	21
2.4.2.3 Volcanic rocks.....	21
2.4.3 Supra-ophiolitic sedimentary rocks	22

2.5 Geochemistry	25
2.5.1 Analytical methods	25
2.5.2 Volcanic rocks	25
2.5.3 Gabbros, diorites and granitoids	27
2.6 Discussion	33
2.6.1 The Lac-Brompton ophiolite as the remnant of forearc oceanic lithosphere	33
2.6.2 Is the Lac-Brompton ophiolite the remnant of an oceanic core complex?	34
2.6.3 The Lac-Brompton ophiolite – a synthetic model	36
2.7 Concluding remarks	39
2.8 Acknowledgements	39
CHAPITRE III	
GÉOLOGIE STRUCTURALE	41
3.1 Structures observées	41
3.2 Foliation de la péridotite mantellique	42
3.3 Fabrique d'obduction	42
3.4 Structures post-obduction	42
3.4.1 Domaine structural I	43
3.4.2 Domaine structural II	43
3.4.3 Domaine structural III	44
3.5 Synthèse structurale	44
CHAPITRE IV	
MÉTALLOGÉNIE	53
4.1 Gîtes et indices minéraux étudiés	53
4.2 Gîtes de cuivre associés aux roches mafiques et ultramafiques	53
4.2.1 Gîte Brompton Copper Extension	53
4.2.2 Gîte Brompton Copper	54
4.3 Indices associés aux roches sédimentaires supra-ophiolitiques	56
4.3.1 Indice Cobre	56
4.3.2 Conglomérat polygénique du gîte Brompton Copper	58
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	60
ANNEXE A	
RÉSULTATS DES ANALYSES GÉOCHIMIQUES	63

ANNEXE B	
RÉSULTATS DES ANALYSES À LA MICROSONDE	68
APPENDICE A	
CARTE GÉOLOGIQUE DE LA RÉGION DU LAC BROMPTON	94
RÉFÉRENCES.....	95

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Carte géologique montrant les principales unités lithostratigraphiques des Appalaches du sud du Québec (région de l'Estrie et de la Beauce). Modifiée de Schroetter (2004).....	5
Figure 2.1 : a) Geological map of the southern Québec Appalachians; b) Cross-section showing main structural features of the Humber and Dunnage zones, from Schroetter, Tremblay and Bédard (2005)	16
Figure 2.2 : Geological map of the Lac-Brompton ophiolite showing the northernmost and southernmost extensions of the Mont-Orford and Asbestos ophiolites respectively. Samples and field photographs (fig. 2.3) are located	18
Figure 2.3 : Photograph of a) upper mantle harzburgite exhibiting dunitic bands which could be transposed dykes; b) pyroxenite dyke with boninitic geochemical affinities crosscutting upper mantle harzburgite and characterized by harissitic margins; c) typical boninitic pillowed lava flow of the Lac-Brompton ophiolite, tops are to the north; d) erosional unconformity between altered peridotite (serpentine – tremolite – calcite – chromite) and laminated mudstones of the Saint-Daniel Mélange; e) sketch detailing important features of figure 2.3d; f) polymict debris flow containing clasts of gabbro, plagiogranite, basalt and pyroxenite embedded in a chlorite-rich matrix, typical of the basal conglomeratic sedimentary rocks of the Saint-Daniel Mélange	23
Figure 2.4 : TiO ₂ -MgO variations diagram for the Lac-Brompton boninites and Mont-Orford volcanic rocks (this study). Compositional fields for southern Québec ophiolitic volcanic rocks and diabbases are from Laurent and Hébert (1989)	28
Figure 2.5 : MORB-normalized spider diagram for the a) Lac-Brompton boninites and pyroxenite dykes and the South Pacific boninites (Hickey and Frey, 1982; Taylor <i>et al.</i> , 1994); b) Mont-Orford ophiolite volcanic rocks (this study), transitional MORB's of the Bouvet Triple Junction (Le Roex <i>et al.</i> , 1985) and back-arc basin basalts (Gribble <i>et al.</i> , 1998; Leat <i>et al.</i> , 2000). Data normalized to MORB values of Sun and McDonough (1989)	28

Figure 2.6 : Cr-Y tectonic discrimination diagram (Pearce, 1982) for the Lac-Brompton boninites, Mont-Orford volcanic rocks (this study) and the South Pacific boninites (Hickey and Frey, 1982; Taylor *et al.*, 1994); back-arc basin basalts (Leat *et al.*, 2000) and Mont-Orford upper volcanic rocks and late-stage dykes (Huot, Hébert and Turcotte, 2002).....29

Figure 2.7 : Chondrite-normalized REE diagram for the a) Lac-Brompton boninites and pyroxenite dykes, grey field for the South Pacific boninites (Hickey and Frey, 1982; Taylor, *et al.*, 1994); b) Mont-Orford ophiolite volcanic rocks, back-arc basin basalts (Gribble *et al.*, 1998; Leat *et al.*, 2000), Mont-Orford ophiolite upper volcanic rocks and late-stage dykes (Harnois and Morency, 1989; Huot, Hébert and Turcotte, 2002) and Transitional MORB's of the Bouvet Triple Junction (Le Roex, *et al.*, 1985); c) Lac-Brompton gabbros and diorites; d) Lac-Brompton plagiogranites, two-mica granites, and Thetford-Mines ophiolite peridotite-hosted granitoids (Whitehead, Dunning and Spray, 2000). Normalizing values are from Sun and McDonough (1989).....30

Figure 2.8 : ORG-normalized trace element diagram for the a) Lac-Brompton plagiogranites (empty squares), volcanic arc granites (grey field; Pearce, Harris and Tindle, 1984) and Thetford-Mines ophiolite plagiogranites (stippled field; Whitehead, Dunning and Spray, 2000); b) Lac-Brompton two-mica granites (empty circles) and Thetford-Mines ophiolite peridotite-hosted granitoids (grey field; Whitehead, Dunning and Spray, 2000). Values used for normalization are ocean-ridge granites of Pearce, Harris and Tindle (1984).....31

Figure 2.9 : Trace element discrimination diagrams for the Lac-Brompton plagiogranites (empty squares), two-micas granites (empty circles; plotted samples have > 56% SiO₂) and Thetford-Mines ophiolite peridotite-hosted granitoids (grey field; Whitehead, Dunning and Spray, 2000); a) Rb vs Y+Nb; b) Nb vs Y; The dotted compositional field is for forearc-related granitic rocks from the Thetford-Mines (Olive, Hébert and Loubet, 1997; Whitehead, Dunning and Spray, 2000), Antalya, Vourinos, Troodos and Oman ophiolites (Pearce, Harris and Tindle, 1984).....32

Figure 2.10 : TiO₂-Zr diagram for the Lac-Brompton boninites (crosses), diorites (up-side down triangles) and plagiogranites (empty squares), and Mont-Orford ophiolite volcanic rocks (dot-stippled field; Harnois and Morency, 1989); inferred fractionation trends are indicated by arrows. A grey compositional field for a suite of boninite - andesite - dacite - rhyolite from Chichijima, Bonin islands (Taylor, *et al.*, 1994) is shown. Arrows in the upper left corner are for mineral fractionation trends (I: intermediate composition; A: acid composition; Pearce and Norry, 1979)32

- Figure 2.11 : Tectonic model of the Lac-Brompton ophiolite; a) East-dipping subduction zone and immature arc crust formation (preserved as the dyke and sill complex and part of the lower volcanic unit of the Mont-Orford ophiolite); b) Formation of a ca. 480 Ma marginal basin in a forearc setting; c) Exhumation and erosion of the Lac-Brompton ophiolite mantle peridotites in an oceanic core complex 38
- Figure 3.1 : Contact entre la harzburgite mantellaire et les roches métamorphiques de la semelle tectonique de l'ophiolite du Lac-Brompton 46
- Figure 3.2 : Photo de terrain montrant la trace du clivage S_4 et de la stratification S_0 sur le flanc est du pli anticlinal régional P_4 (domaine III). La polarité sédimentaire est vers l'est..... 46
- Figure 3.3: a) Pôles du clivage S_4 mesurés sur l'ensemble de la région à l'étude; b) Mesures de la linéation d'intersection L_{0-4} 47
- Figure 3.4 : Coupe géologique dans la partie nord de la région à l'étude (sous-domaine IIb), elle illustre les principaux éléments structuraux et relations stratigraphiques 48
- Figure 3.5 : Pôles du clivage S_3 dans le domaine I. 49
- Figure 3.6 : Coupe géologique dans la partie SO de l'ophiolite du Lac-Brompton et localisée sur l'appendice A 50
- Figure 3.7 : a) Pôles du clivage S_3 dans le sous-domaine IIa; b) Linéation d'intersection L_{3-4} dans le sous-domaine IIa; c) Pôles de la stratification dans les sous-domaines IIa et IIb 51
- Figure 3.8 : Photo de terrain montrant un siltstone verdâtre de la base du Mélange de Saint-Daniel dans le sous-domaine IIa. Le clivage S_3 pente fortement vers le sud et est crénelé par le clivage S_4 . La linéation d'intersection L_{3-4} plonge fortement vers le sud 52
- Figure 3.9 : Mesures structurales du domaine III; a) Pôles du clivage S_3 ; b) Pôles de la stratification..... 52

Figure 4.1 : Photo d'un échantillon pris à l'indice de cuivre Cobre. La minéralisation est localisée au contact entre des mudstones rouges et verts de la base du Mélange de Saint-Daniel.....57

Figure 4.2 : Photographie prise au microscope, celle-ci montre un grain de chromite dans une matrice microcristalline de quartz équi-granulaire, des cristaux aciculaires de trémolite sont également visible dans la matrice. Cet échantillon provient d'un fragment de chert dans le conglomérat polygénique du gîte Brompton Copper. La présence de chromite dans ce chert indique que cette roche résulte de la silicification d'une roche ultramafique59

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Résultats des analyses géochimiques..... 79

Annexe B : Résultats des analyses à la microsonde..... 84

LISTE DES APPENDICES

Appendice A : Carte géologique de la région du lac Brompton	110
-------------------------------------------------------------------	-----

RÉSUMÉ

Les ophiolites du sud du Québec sont situées à l'est de la ligne Baie Verte-Brompton, une importante zone de faille représentant approximativement la limite entre les roches d'affinité océanique (zone de Dunnage) et continentale (zone de Humber). Jusqu'à maintenant, trois ophiolites ont été reconnues dans les Appalaches canadiennes, celles du Mont-Orford, de Thetford-Mines et d'Asbestos. La région du lac Brompton est caractérisée par la présence de roches mafiques – ultramafiques et sédimentaires d'affinité océanique. Elles ont été historiquement interprétées comme faisant partie d'un mélange ophiolitique génétiquement relié à l'ophiolite du Mont-Orford. Nos travaux de cartographie démontrent cependant que les roches mafiques – ultramafiques de la région constituent une ophiolite à part entière, nous lui avons donné le nom du Lac-Brompton. Les roches ultramafiques sont essentiellement représentées par de la péridotite appauvrie de composition harzburgitique, celle-ci est recouverte par une mince bande discontinue de roches volcaniques d'affinité boninitique. Une série d'intrusions constituées de pyroxénite, gabbro/diorite et de granitoïdes recoupent la péridotite. Cette stratigraphie s'apparente à celle de certains segments de croûte océanique de la ride Médio-Atlantique, où des péridotites du manteau sont localement exhumées jusqu'au fond océanique (« cores complexes »). Les observations de terrain indiquent que les roches mafiques – ultramafiques de l'ophiolite du Lac-Brompton sont limitées par une surface d'érosion soulignant le contact avec les roches sédimentaires du Mélange de Saint-Daniel. Les résultats des travaux de géochimie, stratigraphie et d'analyse structurale suggèrent que 1) l'ophiolite du Lac-Brompton est exposée au sein d'une fenêtre structurale formée par la superposition de deux phases de déformation post-obduction et que 2) l'ophiolite du Lac-Brompton peut être corrélée avec les ophiolites d'Asbestos et de Thetford-Mines, formant ainsi une seule et même nappe ophiolitique recouverte par le Mélange de Saint-Daniel.

Appalaches, ophiolite, Lac Brompton, boninite, harzburgite, Mélange de Saint-Daniel

INTRODUCTION

Depuis les années 70, les ophiolites sont considérées comme étant des segments de lithosphère océanique obductée sur les continents. Elles ont depuis fait l'objet de beaucoup de travaux afin de comprendre les phénomènes associés à l'évolution des bassins océaniques anciens et actuels. Trois principaux complexes ophiolitiques sont reconnus au sein des Appalaches du sud du Québec, ceux du Mont-Orford, de Thetford Mines et d'Asbestos. Ils sont situés à l'est d'une importante zone de faille, la ligne Brompton-Baie Verte, qui marque approximativement la limite entre des roches d'affinité continentale (zone de Humber) et d'autres d'affinité océanique (zone de Dunnage). Un massif ultramafique, dominé par la présence de serpentinite et situé au nord de l'ophiolite du Mont-Orford, a récemment été identifié comme étant un autre complexe ophiolitique du sud du Québec : l'ophiolite du Lac-Brompton (Daoust *et al.*, 2005). Ce massif a longtemps été mis à l'écart des projets de recherche, ayant été initialement interprété comme un mélange ophiolitique d'origine diapirique (le Mélange ophiolitique du Lac-Montjoie de Lamothe, 1978), génétiquement associé à l'ophiolite du Mont-Orford. L'objet de la présente recherche a été d'effectuer une cartographie détaillée de l'ophiolite du Lac-Brompton et de la séquence sédimentaire sus-jacente (Mélange de Saint-Daniel) afin de proposer une nouvelle interprétation basée sur l'acquisition de données stratigraphiques, géochimiques et structurales. L'ophiolite du Lac-Brompton est interprétée comme un segment de croûte océanique de supra-subduction d'affinité boninitique possédant une stratigraphie inhabituelle s'apparentant aux « cores complexes » de la ride Médio-Atlantique. L'ophiolite est exposée au sein d'une fenêtre structurale formée par la superposition de charnières anticlinales développées lors d'un épisode de rétrochevauchement (Silurien Supérieur/Dévonien Inférieur) et de plissement tardif (orogénie acadienne; Dévonien Moyen). La lithologie dominante est une harzburgite mantellique recoupée par une série d'intrusions mafiques – ultramafiques et de granitoïdes. Une mince bande de roches volcaniques boninitiques recouvre le manteau. Le Mélange de Saint-Daniel repose en discordance sur l'ensemble des unités ophiolitiques (manteau et croûte), incluant les roches métamorphiques de la semelle tectonique. Les travaux présentés

dans ce mémoire permettent de conclure que l'ophiolite du Lac-Brompton possède de grandes affinités stratigraphiques et géochimiques avec les ophiolites d'Asbestos et de Thetford-Mines, et qu'elle représente vraisemblablement l'extrémité sud d'une même lame ophiolitique. De plus, plusieurs gîtes et indices minéraux sont associés aux roches ophiolitiques et supra-ophiolitiques de la région du lac Brompton. Le nouveau modèle présenté dans ce mémoire permet de mieux comprendre certaines de ces minéralisations.

Ce mémoire de maîtrise est constitué de quatre chapitres; le chapitre I introduit la problématique, les objectifs et la méthodologie employée; le chapitre II est un manuscrit d'article présentant l'essentiel des travaux effectués, lequel sera soumis pour publication dans le *Journal Canadien des Sciences de la Terre*; les chapitre III et IV portent respectivement sur la géologie structurale et la métallogénie de l'ophiolite.

CHAPITRE I

PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

1.1 Problématique et objectifs

Cooke (1951) et St-Julien (1960, 1961, 1966) ont cartographié la région du lac Brompton, les roches ophiolitiques étaient alors considérées comme intrusives dans les roches sédimentaires environnantes. Les roches mafiques – ultramafiques des Appalaches du sud du Québec (fig. 1.1) ont été interprétées comme des ophiolites à la suite des travaux de Laurent (1975, 1977). Lamothe (1978) a cartographié (dans la région du lac Montjoie) une partie de l'ophiolite du Lac-Brompton et conclu, sur la base de l'agencement « chaotique » d'unités métamorphiques, sédimentaires et mafiques – ultramafiques, que ces roches représentaient un mélange ophiolitique mis en place par diapirisme (le Mélange ophiolitique du Lac-Montjoie). Par la suite, Rodrigue (1979) a extrapolé le Mélange ophiolitique du Lac-Monjoie à un mélange ophiolitique tectonique présent à la base de l'ophiolite du Mont-Orford. L'interprétation de Lamothe (1978) est essentiellement basée sur une étude structurale portant sur une très petite fraction (5 Km²) des roches ultramafiques et sédimentaires environnantes ainsi que sur une bande discontinue de roches métamorphiques situées sous l'ophiolite (i.e. la semelle tectonique; Daoust *et al.*, 2005). Puisque ces différents ensembles lithologiques ont subi une évolution structurale et métamorphique contrastée, il existe une certaine « incohérence » entre les structures des roches ophiolitiques, supra-ophiolitiques et celles de la semelle tectonique.

Des travaux récents, effectués sur l'ophiolite de Thetford-Mines et le Mélange de Saint-Daniel (Schroetter, Tremblay et Bédard, 2005; Schroetter *et al.*, 2006), ont démontré que ce dernier forme une série sédimentaire déposée sur l'ophiolite, et non pas un complexe de

subduction dans lequel seraient incorporés tectoniquement les ophiolites (Cousineau et St-Julien, 1992; Tremblay, 1992). Des arguments structuraux présentés par Schroetter, Tremblay et Bédard (2005) suggéraient que les roches ophiolitiques de la région du lac Brompton étaient possiblement associées à celles d'Asbestos et de Thetford-Mines. Ces conclusions demandaient cependant une révision cartographique des roches ultramafiques et sédimentaires de la région du lac Brompton afin de vérifier si une cohérence stratigraphique y était préservée. Lors d'une visite préliminaire, nous avons observé des relations de terrain suggérant la présence d'une importante surface d'érosion entre les roches ultramafiques et le Mélange de Saint-Daniel, et possiblement une stratigraphie cohérente au sein des roches ophiolitiques. De telles observations n'étaient donc pas cohérentes avec le modèle du mélange ophiolitique diapirique. Cette visite sur le terrain a démarré le projet d'étude, qui vise donc à déterminer le contexte stratigraphique, géochimique et structural de l'ophiolite du Lac-Brompton, ainsi qu'à comparer ces observations avec celles des ophiolites du sud du Québec. L'absence d'un modèle stratigraphique et structural cohérent pour l'ensemble de l'ophiolite rend difficile l'interprétation de certains gîtes et indices minéralisés associés aux roches ophiolitiques ou sédimentaires de la région. Le second objectif des travaux a donc été d'établir un modèle métallogénique pour ces minéralisations, celui-ci étant basé sur la révision stratigraphique et structurale de la région d'étude.

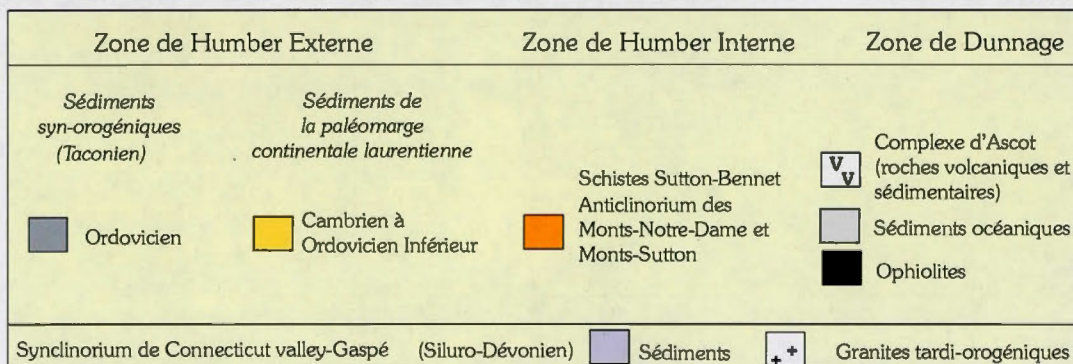
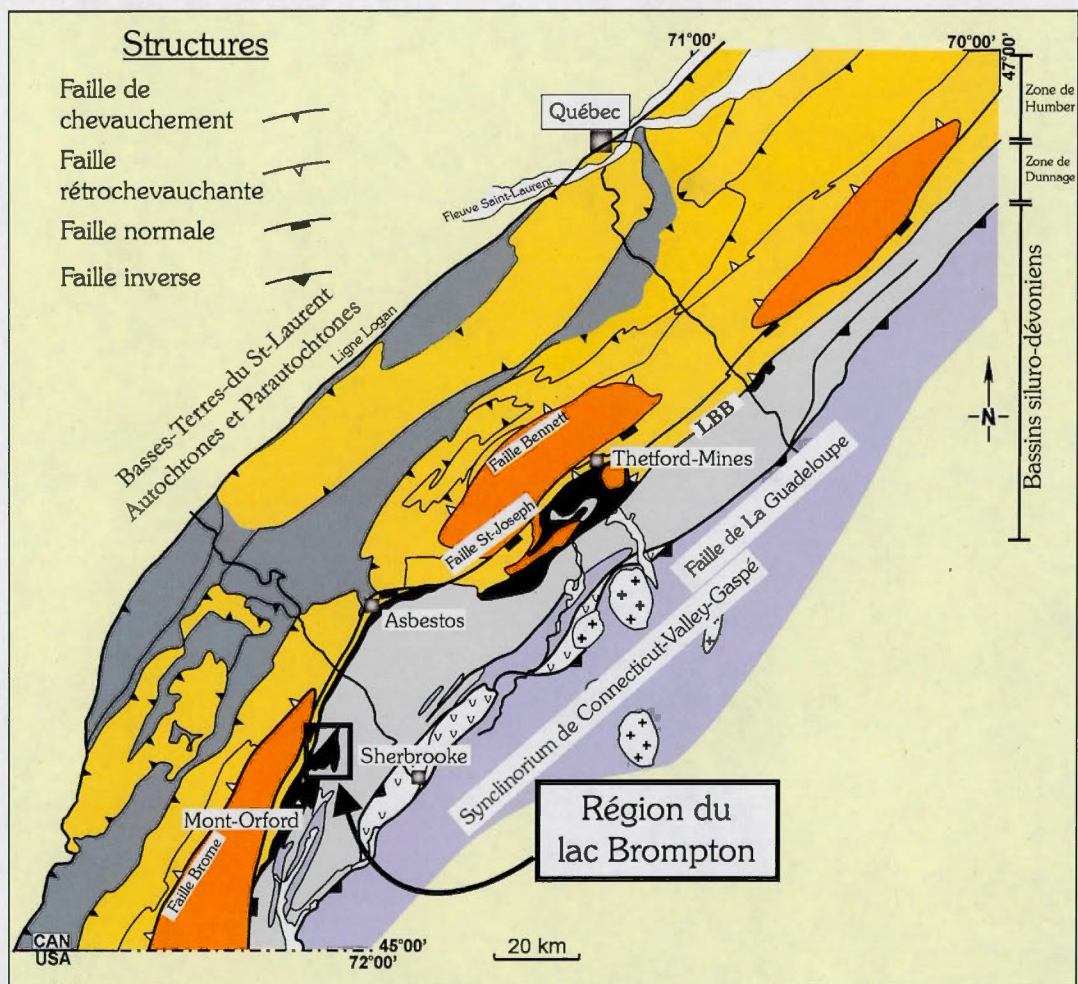


Figure 1.1 : Carte géologique montrant les principales unités lithostratigraphiques des Appalaches du sud du Québec (région de l'Estrie et de la Beauce). LBB, ligne Baie Verte - Brompton. Modifiée de Schroetter (2004).

1.2 Méthodologie

Afin de bâtir une interprétation éclairée sur l'évolution de l'ophiolite du Lac-Brompton, une cartographie détaillée de l'ensemble des unités ophiolitiques s'est avérée nécessaire. En parallèle aux travaux présentés dans ce mémoire, une étudiante de maîtrise, Caroline Daoust, a effectué la caractérisation structurale et géochimique des roches métamorphiques de la semelle tectonique de l'ophiolite. Les travaux de cartographie ont donc été effectués en coopération. Conjointement à la cartographie, l'analyse des structures observées sur le terrain a été réalisée afin de documenter les différents événements tectoniques ayant affecté les roches ophiolitiques et sédimentaires. Une étude géochimique portant sur l'ensemble des unités échantillonnées lors des cheminements sur le terrain a également été entreprise afin d'établir l'affinité magmatique de l'ophiolite du Lac-Brompton. Ces travaux de géochimie ont été complétés par des données de chimie minérale. Une approche aussi complète nous a permis d'élaborer un modèle tectono-magmatique cohérent avec les observations de terrain et les données stratigraphiques, structurales et géochronologiques régionales.

1.2.1 Cartographie géologique

Notre région d'étude couvre environ 60 Km² des feuillets SNRC 31 H/08 et 31 H/09. L'essentiel des travaux de cartographie a été réalisé à l'été 2004 et complété par de courts séjours sur le terrain à l'été 2005. Comme les travaux antérieurs sont d'échelle régionale ou ne portent que sur certaines sections de l'ophiolite du Lac-Brompton, une cartographie complète du massif ophiolitique a été entreprise. Dans certains secteurs, une simple révision d'aspects lithologiques et/ou structuraux s'est révélée suffisante. Les travaux ont été restreints à l'ophiolite du Lac-Brompton et au Mélange de Saint-Daniel, mais quelques affleurements de l'ophiolite du Mont-Orford ont été visités pour l'échantillonnage. Afin de mieux définir la minéralogie, la structure et l'altération des lithologies échantillonnées, une étude pétrographique sur une série de lames minces a été effectuée. La carte géologique réalisée est présentée en pochette (appendice A). Les résultats de l'étude structurale, basée sur des mesures et observations de terrain, sont présentés dans le chapitre III. Les gîtes Brompton Copper, Brompton Copper Extension et l'indice de cuivre Cobre sont les principaux sites

d'intérêt métallogénique visités lors des cheminements. L'étude de ces sites contribue non seulement à la compréhension des minéralisations, mais également à celle de la stratigraphie de l'ophiolite et des roches sédimentaires environnantes.

1.2.2 Géochimie

Les différentes unités lithologiques de l'ophiolite du Lac-Brompton ont été échantillonnées afin de procéder à des analyses géochimiques des éléments majeurs et traces. Cet exercice est indispensable pour déterminer l'affinité magmatique de l'ophiolite et effectuer des comparaisons avec les autres massifs ophiolitiques du sud du Québec et certains bassins océaniques modernes. Deux échantillons de roche volcanique ont également été prélevés dans l'ophiolite du Mont-Orford. Les sites d'échantillonnage sont localisés sur la carte de l'appendice A et les résultats sont présentés à l'annexe A.

1.2.3 Chimie minérale

La chimie des minéraux constituant les péridotites, les roches plutoniques et volcaniques permet de compléter les données de géochimie. Une étude de chimie minérale fournit une nomenclature précise des minéraux primaires et secondaires analysés. Les minéraux sélectionnés pour analyse à la microsonde sont des spinelles chromifères, des pyroxènes et des amphiboles. Les données sont présentées à l'annexe B, alors que les interprétations afférentes sont présentées au chapitre II. Une étude non quantitative au microscope électronique à balayage s'est aussi révélée utile afin de compléter les observations faites au microscope polarisant. Elle a permis une meilleure compréhension de la minéralogie des minéralisations discutées dans le chapitre III.

1.3 Contributions des coauteurs du manuscrit du chapitre II

Le corps de ce mémoire (chapitre II) est constitué d'un manuscrit d'article réalisé avec la participation de trois coauteurs : Alain Tremblay (directeur de recherche), Caroline Daoust

(étudiante à la maîtrise) et Michel Gauthier (codirecteur de recherche). L'objet de la section qui suit est de souligner ma contribution réelle à ce manuscrit.

Les travaux des dernières années effectués dans la région de Thetford-Mines et les observations préliminaires dans les régions d'Asbestos et du lac Brompton par mon directeur de recherche et Jean-Michel Schroetter (voir Schroetter *et al.*, 2003; Schroetter, Tremblay et Bédard, 2005; Schroetter *et al.*, 2006) ont formé les assises de mon projet de maîtrise. Leurs conclusions concernant la structure et la stratigraphie des ophiolites et les relations de celles-ci avec le Mélange de Saint-Daniel recommandaient une cartographie détaillée des roches ultramafiques de la région du lac Brompton. Au printemps 2004, mon directeur, codirecteur, Caroline Daoust et moi-même avons visité des affleurements clés de la région d'étude. Les observations effectuées suggéraient que l'hypothèse du mélange ophiolitique soutenue par Lamothe (1978) n'expliquait pas correctement les relations de terrain. Les roches ophiolitiques du lac Brompton semblaient plutôt montrer une évolution similaire à celles de la région de Thetford-Mines et d'Asbestos. Au cours des travaux de doctorat de Jean-Michel Schroetter, on avait également identifié une bande de roches métamorphiques dans la région du lac Brompton. Celle-ci demandait des travaux de cartographie détaillée et de pétrologie métamorphique, qui ont fait l'objet du mémoire de maîtrise de Caroline Daoust, ma collègue de travail pour les travaux de cartographie. Pendant les travaux de terrain, des visites occasionnelles de mon directeur, codirecteur et autres collègues (Jean H. Bédard et Sébastien Castonguay de la Commission Géologique du Canada à Québec et Gilles Ruffet de l'Université de Rennes), m'ont permis de consolider mes observations et d'échanger sur les interprétations possibles.

Les premières versions du manuscrit du chapitre II sont exclusivement le produit de mes travaux et réflexions personnelles sur le sujet. Sauf en ce qui concerne la carte géologique de l'appendice A, une production de Caroline Daoust et moi-même, tous les tableaux, figures, annexes et conclusions du chapitre II de ce mémoire ont été réalisés par moi-même.

CHAPITRE II

STRATIGRAPHY AND GEOCHEMISTRY OF THE LAC-BROMPTON OPHIOLITE, CANADA : EVIDENCE FOR EXTENSIVE FOREARC MAGMATISM AND MANTLE EXHUMATION IN THE SOUTHERN QUÉBEC OPHIOLITE BELT

Ce chapitre présente un manuscrit d'article dans lequel est détaillé l'essentiel des observations de terrain, travaux de géochimie, chimie minérale et les conclusions qui en découlent. Ce manuscrit d'article sera soumis pour publication dans le *Journal Canadien des Sciences de la Terre*.

STRATIGRAPHY AND GEOCHEMISTRY OF THE LAC-BROMPTON OPHIOLITE,
CANADA : evidence for extensive forearc magmatism and mantle exhumation in the
Southern Québec ophiolite Belt

DE SOUZA, Stéphane, TREMBLAY, Alain, DAOUST, Caroline,
and GAUTHIER, Michel

Abstract

Until now, three ophiolites have been recognized in the southern Québec Appalachians, from south to north : the 504 \pm 3 Ma Mont-Orford ophiolite, dominated by tholeiitic to transitional-alkaline basalt and diabase, and the ca. 480 Ma Thetford-Mines and Asbestos ophiolites which are made up of boninites and tholeiitic basalts. This paper concerns the origin, geochemistry and tectonic evolution of the newly-identified Lac-Brompton ophiolite, previously interpreted as a diapiric serpentinite-rich mélange (Lac-Montjoie ophiolitic Mélange; Lamothe, 1978) genetically associated to the Mont-Orford ophiolite. Geological mapping and geochemistry of mafic and ultramafic rocks, together with comparisons with recent oceanic basins rather indicate that these rocks represent an exhumed segment of oceanic mantle and boninitic crust. The ophiolite massif is dominated by serpentinitized harzburgite crosscut by intrusions of gabbro/diorite, pyroxenite and plagiogranite, and overlain by a sequence of boninitic volcanic rocks. The harzburgite and boninites, together with the underlying tectonic sole, are overlain by fine-grained sedimentary rocks and conglomerates belonging to the Saint-Daniel Mélange. The internal stratigraphy of the ophiolite and relationships with the adjacent Saint-Daniel Mélange imply that the harzburgite was exhumed to seafloor level early in its evolution, prior to boninitic magmatism, and deeply eroded during or shortly after its obduction. The oceanic evolution of the Lac-Brompton ophiolite is comparable to ultramafic massifs exposed along slow-spreading ridge

segments, which are termed oceanic core complexes. Stratigraphical and structural analysis of ophiolitic and overlying sedimentary rocks, together with the boninitic affinity of the Lac-Brompton ophiolite, suggests that it is affiliated to the Asbestos and Thetford-Mines ophiolites. Together they form a large slab of obducted forearc seafloor, the Thetford-Mines – Asbestos – Lac-Brompton oceanic slab, of which the Lac-Brompton ophiolite represents the southernmost extremity.

2.1 Introduction

Ophiolites represent slivers of oceanic lithosphere obducted onto continental margins and incorporated into collisional orogens during the closure of ancient oceanic basins (Coleman, 1971, 1977; Anonymous, 1972; and references therein). The geochemical characterization of “classical” ophiolite complexes such as, for instance, the Semail (Oman), Troodos (Cyprus), Zambales (New Guinea) and Bay of Islands (Canada) ophiolites (Miyashiro, 1973; Schweller, Karig and Bachman, 1983; Elthon, 1991; Jenner *et al.*, 1991; Ishikawa, Nagaishi and Umino, 2002) and comparisons with recent subduction-related volcanic systems, suggest that most ophiolites were formed at, or close to, marginal basin oceanic ridges and are related to subduction, i.e., a tectonic setting commonly referred to as supra-subduction zone environments (arc, forearc, back-arc; Pearce, Lippard and Roberts, 1984; Hawkins, 2003; Pearce, 2003).

The Southern Québec ophiolite Belt (extending from Thetford-Mines to Mont-Orford), historically interpreted as a collage of different segments of an ocean ridge system (Laurent, 1975), has been re-interpreted as the vestige of an immature Early Ordovician island arc system developed along a southeast-dipping (present coordinates) subduction zone (Laurent and Hébert, 1989; Tremblay, 1992; Pinet and Tremblay, 1995a, 1995b; Schroetter *et al.*, 2003). From north to south, the ophiolite belt is mainly represented by the Thetford-Mines, Asbestos and Mont-Orford ophiolites (fig. 2.1a). The Thetford-Mines and Asbestos ophiolites are almost exclusively made up of plutonic and volcanic rocks of boninitic affinity and have been classified as low-Ti ophiolitic sequences (Oshin and Crocket, 1986; Hébert and Laurent, 1989; Laurent and Hébert, 1989; Harnois, Trottier and Morency, 1990; Olive, Hébert and

Loubet, 1997; Hébert and Bédard, 2000; among others). In contrast, the Mont-Orford ophiolite is classified as a high-Ti ophiolite, as it is rather dominated by interlayered island arc tholeiites, MORB's and transitional-alkaline basalts (Harnois and Morency, 1989; Laurent and Hébert, 1989; Huot, Hébert and Turcotte, 2002)

This contribution presents a detailed geochemical and stratigraphical analysis of a newly-identified ophiolite massif of the Southern Québec ophiolite Belt, the Lac-Brompton ophiolite. It was previously interpreted as a diapiric, serpentinite-rich mélange (Lamothe, 1978) genetically related to the Mont-Orford ophiolite (Rodrigue, 1979). The Lac-Brompton ophiolite consists mostly of upper mantle peridotites crosscut by pyroxenites, gabbros and granitoids (see below), overlain by a discontinuous boninitic volcanic sequence. The overlying sedimentary rock sequence consists mainly of conglomeratic to fine-grained deep-water facies belonging to the Saint-Daniel Mélange (Schroetter *et al.*, 2006). Our data also suggests that the Lac-Brompton ophiolite represents an exhumed, deeply eroded crustal and mantle section of oceanic lithosphere formed along a slow-spreading ridge in a forearc basin environment. In the following sections, we will describe the stratigraphical setting and geochemical characteristics of the Lac-Brompton ophiolite, and argue that it does not belong to the Mont-Orford ophiolite but represents the southernmost extension of a large slab of Ordovician oceanic seafloor that is mainly preserved in the Thetford-Mines and Asbestos complexes.

2.2 Geological Setting

The southern Québec Appalachian belt comprises three lithotectonic assemblages (fig. 2.1a): the Cambrian-Ordovician Humber and Dunnage zones (Williams, 1979), and the Silurian-Devonian sedimentary sequence of the Connecticut Valley-Gaspé trough (Bradley, 1983; Bourque, Brisebois and Malo, 1995; Tremblay and Pinet, 2005). The Humber and Dunnage zones are remnants of the Laurentian continental margin and of the adjacent oceanic domain, respectively. The boundary between the Humber and Dunnage zones corresponds (on the surface) to a zone of dismembered ophiolites and serpentinite slices known as the Baie Verte-Brompton line (BBL; Williams and St-Julien, 1982). Recently, Tremblay and Castonguay

(2002) have argued that the BBL forms a composite structure with the Saint-Joseph fault, and that both represent a major normal fault system with the Southern Québec ophiolite Belt occurring in the hanging wall (fig. 2.1b).

The Humber zone is subdivided into an external zone which consists of very low-grade sedimentary and volcanic rocks and an internal zone made up of greenschist- to amphibolite-grade metamorphic rocks (the Sutton-Bennett Schist on fig. 2.1a; St-Julien and Hubert, 1975; Tremblay and Castonguay, 2002). Regional deformation phases include a S_{1-2} schistosity overprinted by a penetrative crenulation cleavage (S_3 of Tremblay and Pinet, 1994) that is axial-planar to hinterland-verging (southeast) folds and ductile shear zones. Amphibole and mica $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages from the internal Humber zone vary between 431 and 410 Ma, except for the occurrence of Ordovician high-temperature step ages (462-460 Ma) in the Arthabaska Amphibolites, which indicate that the geochronological imprint of the Middle Ordovician Taconian metamorphism is only locally preserved in the Sutton-Bennett Schist (e.g. Castonguay *et al.*, 2001; Tremblay and Castonguay, 2002; Castonguay, Ruffet and Tremblay, 2007). East of the Saint-Joseph-BBL fault system, Laurentian continental metamorphic rocks, which yielded Middle Ordovician $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ muscovite ages 469-461 Ma (Castonguay *et al.*, 2001; Castonguay, Ruffet and Tremblay, 2007) occur structurally below the ophiolites and are locally exposed through Acadian-related antiformal culminations (fig 2.1a).

The Dunnage zone comprises four lithotectonic assemblages (fig. 2.1a): (1) the Southern Québec ophiolite Belt; (2) the Saint-Daniel Mélange; (3) the Magog Group; and (4) the Ascot Complex (see Tremblay, Malo and St-Julien, 1995 for a review).

Within the Southern Québec ophiolite Belt, the Thetford-Mines and Asbestos ophiolites are characterized by well-preserved mantle and crustal sections, whereas only the mantle and a discontinuous part of the oceanic crust is exposed in the Lac-Brompton ophiolite (Daoust *et al.*, 2005; De Souza *et al.*, 2006; see below). U/Pb zircon dating from felsic intrusive rocks of the Thetford-Mines and Asbestos ophiolites yielded ages of 479 ± 3 and $478-480 +3/-2$ Ma, respectively (Dunning, Krogh and Pedersen, 1986; Dunning and Pedersen, 1988; Whitehead, Dunning and Spray, 2000). Amphibolites from the dynamothermal sole of the Thetford-

Mines ophiolite yielded $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of 477 ± 5 Ma (Whitehead, Reynolds and Spray, 1995), suggesting that intra-oceanic detachment of the ophiolite (ca. 477 Ma) occurred immediately after oceanic crust formation (ca. 480 Ma); with emplacement against continental margin rocks and associated metamorphism occurring afterwards (ca. 470-460 Ma). Both the Thetford-Mines and Asbestos ophiolites are dominated by boninitic intrusive and extrusive rocks, a feature which has been attributed to their genesis in a supra-subduction zone environment (Oshin and Crocket, 1986; Hébert and Laurent, 1989; Laurent and Hébert, 1989; Olive, Hébert and Loubet, 1997; Hébert and Bédard, 2000). In contrast with other complexes, only the crustal section of the oceanic lithosphere is preserved in the Mont-Orford ophiolite, which is also characterized by a greater diversity of magma types, interpreted in terms of arc-backarc (Harnois and Morency, 1989; Laurent and Hébert, 1989), or arc-forearc to backarc tectonic settings (Huot, Hébert and Turcotte, 2002). U/Pb zircon (with inherited Grenvillian cores) geochronology on a trondhjemitic of the Mont-Orford ophiolite yielded 504 ± 3 Ma (David and Marquis, 1994).

The Saint-Daniel Mélange (fig. 2.1a) is a Llanvirn stratigraphic unit that represents the lowermost series of a syn-collisional (forearc) basin that lies on a partly-eroded ophiolite substrate (the Southern Québec ophiolite Belt) and which is mainly represented by the Magog Group (Schroetter *et al.*, 2006). The base of the Saint-Daniel is marked by a major erosional unconformity. Chaotic and breccia units characterizing the mélange were formed by synorogenic uplift, erosion, and burial of the ophiolite basement and underlying metamorphic rocks by heterogeneous and, most likely, channelized debris flows (see Schroetter *et al.*, 2006 for details). The Magog Group (fig. 2.1a; Cousineau and St-Julien, 1994) represents an onlapping flysch sequence unconformably overlying the Saint-Daniel Mélange. It is made up of (i) lithic sandstones and black shales of the Frontière Formation; overlain by (ii) purple-to-red shales, green siliceous siltstones and volcanoclastic rocks of the Etchemin Formation; overlain by (iii) pyritous black shales and volcanoclastic rocks of the Beauceville Formation; overlain by (iv) sandstones, siltstones and shales with minor tuffs and conglomerates of the Saint-Victor Formation, which makes up ca. 70% of the total thickness of the Magog Group. Graptolites, *Nemagraptus gracilis*, found in the Beauceville and Saint-Victor formations are Late Llandeilian to Early Caradocian (Middle Ordovician). The Ascot Complex (fig. 2.1a) is

interpreted as the remnant of a 460 ± 3 Ma (David and Marquis, 1994) volcanic arc sequence (Tremblay, 1989; Tremblay, Ruffet and Castonguay, 2000). It is made up of various types of metavolcanic rock series, overlain by and in fault contact with laminated and pebbly phyllites that have been correlated with the Saint-Daniel Mélange (Tremblay and St-Julien, 1990).

Regional deformation and metamorphism in the southern Québec Dunnage zone are related to the Middle Devonian Acadian orogeny (Tremblay, 1992; Cousineau and Tremblay, 1993). Peak metamorphism varies from greenschist grade in the south (i.e., in the vicinity of the Québec-Vermont border), to prehnite-pumpellyite grade in the Chaudière river area (fig. 2.1a). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of greenschist-grade metamorphic rocks of the Ascot Complex yielded ca. 380-375 Ma (Tremblay, Ruffet and Castonguay, 2000). The Magog Group is characterized by tight regional folds, generally overturned to the NW. Folds plunge gently or moderately to the SW or the NE. Evidence for intense Ordovician (Taconian) metamorphism and deformation is lacking. Schroetter *et al.* (2005) have shown that the Humber zone, the southern Québec ophiolites and the overlying Saint-Daniel Mélange share a similar structural evolution. Detailed mapping in the Thetford-Mines area has been used to discriminate pre-, syn- and post-obduction structures. NS-trending pre-obduction faults, parallel to a locally-preserved sheeted dyke complex and associated with "late" ultramafic intrusions, crosscut the ophiolitic lower crust and are marked by sheared or mylonitic dunites and syn-magmatic breccias. These faults correspond to lateral changes in the thickness and facies assemblages seen in the supracrustal rock sequence and have upwardly decreasing throws indicating that they are growth faults (Schroetter *et al.*, 2003). Syn-obduction (Taconian) structures include shear zones and ductile fabrics developed in the ophiolitic metamorphic sole, and in the immediately overlying mantle and underlying continental margin rocks. Two generations of post-obduction structures are recognized: (i) SE-verging backthrusts and backfolds correlated with the Late Silurian-Early Devonian deformational episode recorded in the Humber zone; and (ii) NW-verging folds and reverse faults attributed to the Acadian orogeny.



Figure 2.1 : a) Geological map of the southern Québec Appalachians; b) Cross-section showing main structural features of the Humber and Dunnage zones, modified from Schroetter, Tremblay and Bédard (2005) . MOOC, Mont-Orford ophiolite complex; AOC, Asbestos ophiolite complex; TMOC, Thetford-Mines ophiolite complex.

2.3 The Lac-Brompton ophiolite

Ultramafic and mafic rocks of the Lac-Brompton area were first interpreted as a diapiric ophiolitic mélange, the Lac-Montjoie mélange (Lamothe, 1978), that was considered to be genetically related to the Mont-Orford ophiolite (Rodrigue, 1979). Lamothe (1978) only mapped a small area (5 Km²) of the lowermost part of the Lac-Brompton ophiolite and concluded, based on the «chaotic» occurrence of metamorphic rocks (pelitic schists, greenstones and amphibolites), sandstones, conglomerates and serpentinites, that these rocks were part of a diapiric serpentine-rich mélange. Later, Rodrigue (1979) extrapolated Lamothe's interpretation southward into the Mont-Orford ophiolite, where he recognized a 130 metres thick tectonic mélange situated at the base of the ophiolite. However, recent geological mapping in the Lac-Brompton area (Daoust *et al.*, 2005; Schroetter, Tremblay and Bédard, 2005; Schroetter *et al.*, 2006) indicates that discontinuous horizons of greenschist- to amphibolite-grade metamorphic rocks, and overlying ultramafic – mafic and sedimentary rock sequences, represent different stratigraphic levels of a dissected but well-preserved ophiolite, cropping out through a regional antiformal culmination in the core of a NNE-trending Acadian fold. Upper mantle peridotites, predominantly represented by serpentinitized harzburgite and minor dunite, form approximately 90% of ophiolitic lithologies of the Lac-Brompton ophiolite (fig. 2.2). In the southern part of the ophiolite, upper mantle peridotites are in fault contact with a belt of metasedimentary and metavolcanic rocks interpreted as the remnant of a sub-ophiolitic metamorphic sole (Daoust, De Souza and Tremblay, 2006). A series of irregular and discontinuous ultramafic to mafic intrusions and associated plagiogranites crosscut the mantle sequence. Well-preserved volcanic rocks occur in the northernmost part of the Lac-Brompton ophiolite, where they form a thin (<200 m thick) and discontinuous extrusive sequence directly overlying the peridotites (fig. 2.2). At several localities, both the Lac-Brompton ophiolitic sequence and underlying metamorphic rocks are disconformably overlain by conglomeratic to fine-grained sedimentary rocks included in the Saint-Daniel Mélange. In the following section, the petrographic and field characteristics of the various units of the Lac-Brompton ophiolite and the overlying sedimentary sequence are described.

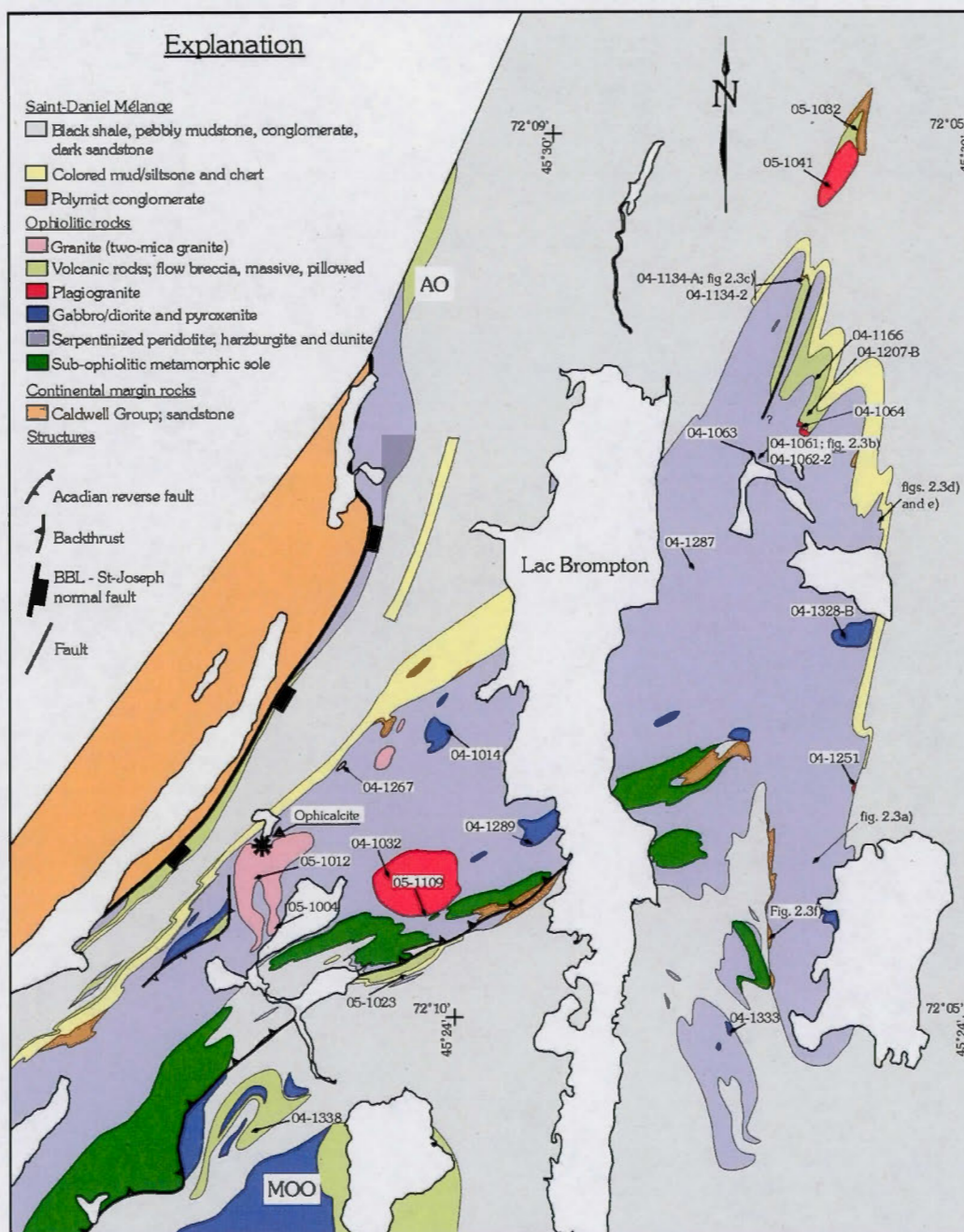


Figure 2.2 : Geological map of the Lac-Brompton ophiolite showing the northernmost and southernmost extensions of the Mont-Orford (MOO) and Asbestos (AO) ophiolites. Samples and field photographs (fig. 2.3) are located. *: opihicalcite.

2.4 Petrography and field characteristics

2.4.1 Mantle peridotites

Mantle peridotites mainly consist of serpentinized harzburgite and dunite that form topographic highs in the area (fig. 2.2). This mantle sequence is sheared, along its lower contact, against the underlying metamorphic sole, whereas the upper contact with the Saint-Daniel Mélange is an erosional unconformity (see below). The typical harzburgite has a rough, reddish-brown weathered surface and a dark green to black fresh surface. The dunite is rather white to reddish-brown, strongly magnetic and has a smooth weathered surface. Unaltered orthopyroxene or clinopyroxene crystals have not been observed. Modal orthopyroxene varies from 20 to 40% and Cr-rich spinels between <1 to 3 % in the harzburgite. Orthopyroxene crystals are commonly pseudomorphosed by bastite, whereas olivine is replaced by hourglass-textured lizardite with tremolite and magnetite. Chromite occurs as disseminated, euhedral to ameboid or nodular crystals, or as schlieren and pods. The peridotites are medium-grained and pervasively serpentinized. They frequently show a high-temperature foliation marked by the alignment of chromite and pyroxene porphyroclasts and/or by a lithological banding defined by alternating peridotite and dunite layers (fig. 2.3a). Clinopyroxenite and peridotite dykes crosscutting the peridotites are widespread. These dykes are coarse-grained to pegmatitic (0,5-1 to 5 cm) and locally show well-developed harissitic margins (fig. 2.3b).

At the contact with the overlying volcanic and/or sedimentary rock sequences, the mantle peridotite is typically brecciated and strongly altered into an assemblage of serpentine – tremolite – carbonate with asbestos veinlets. Similarly brecciated peridotite samples from the seafloor of the Mariana and Izu-Bonin forearc basins have been interpreted as the result of volume expansion due to serpentinization and seawater circulation in the block-faulted oceanic mantle (Fryer *et al.*, 1995). Well-preserved ophicalcites are also found close to the contact between peridotites and sedimentary rocks in the western part of the ophiolite (fig. 2.2). Peridotites from these sites are transformed into green- to red-coloured hydrothermal marble consisting of tremolite, actinolite, talc and calcite \pm hematite crosscut by a network of calcite and actinolite veins. O and C isotopic studies of similar ophicalcites occurring north of

the Thetford-Mines region, in the Chaudière River area, suggested that the carbonate-rich cement of these breccias was precipitated from seawater contaminated by volcanically-derived CO_2 (Lavoie and Cousineau, 1995). Such ophicalcites are also common in Alpine ophiolites and ultramafic massifs directly overlain by mafic volcanic rocks and/or pelagic sedimentary rocks, implying that these were originally ultramafic rocks which were exhumed to the seafloor (Bernoulli, 1985; Lagabriele and Lemoine, 1997).

2.4.2 Crustal rocks

2.4.2.1 Pyroxenites, gabbros and diorites

A typical ophiolitic crustal sequence, commonly made up of ultramafic cumulates grading into cumulate and isotropic gabbros overlain by sheeted dykes and mafic volcanic flows is lacking in the Lac-Brompton ophiolite. The plutonic section is rather discontinuous and consists mostly of cumulate pyroxenite, gabbro/diorite and plagiogranite intrusions representing less than 10% of ophiolitic lithologies. Intrusions of two-mica granitoids were also found. The cumulate pyroxenite is coarse-grained and varies in composition from websterite to clinopyroxenite, and contains traces of magnetite. Clinopyroxene ($\text{En}_{45}\text{Wo}_{48}\text{Fs}_7$; Mg# 93) crystals are commonly replaced by actinolite/tremolite whereas orthopyroxene is pseudomorphosed by bastite.

Gabbros vary from leucocratic to mesocratic and from fine- to coarse-grained. Clinopyroxene ($\text{En}_{45}\text{Wo}_{44}\text{Fs}_{10}$; Mg# 75-97) and minor interstitial pargasite have been observed. A cumulate texture is sometimes preserved but most gabbros are isotropic or brecciated. Clinopyroxenes occasionally show rims of tremolite/actinolite. Diorites are massive and commonly have medium- to coarse-grained amphibole as the dominant ferro-magnesian mineral. In thin section, fibrous or anhedral, colorless to light-green actinolite replaces magnesio-hornblende or clinopyroxene along fractures and grain boundaries. Plagioclase is saussuritized.

2.4.2.2 Granitoids

Two types of quartz-bearing intrusive rocks are also found in the Lac-Brompton ophiolite. They can be distinguished by their contrasting mineralogy and geochemical characteristics (see below). The first type is similar to oceanic plagiogranites commonly found in ophiolites (Coleman and Peterman, 1975; Coleman and Donato, 1979), and differs from diorites (described above) in having higher (11-25%) modal quartz and SiO_2 content (>56%) and lower CaO , Al_2O_3 and MgO values (see below). The plagiogranites have modal compositions of quartz monzodiorite or tonalite and are medium-grained. The dominant mafic mineral is a dark green to brown, magnesio-hornblende, partially altered into actinolite and/or chlorite. Biotite crystals are partially to totally chloritized. Plagioclase is commonly replaced by epidote, chlorite, calcite and sericite. These plagiogranites form small to large, massive or brecciated masses that are commonly spatially related to gabbros/diorites or to the volcanic cover sequence (fig. 2.2).

The second type of quartz-bearing intrusion consists of fine- to coarse-grained, foliated to unfoliated, quartz-rich (25-35%) muscovite- and/or biotite-bearing granites. Foliated specimens show dark brown to reddish biotite crystals marking the foliation plane. Unfoliated occurrences are brecciated or massive intrusions locally displaying a granophyric texture. Plagioclase is commonly saussuritized whereas alkali feldspars are fresh and perthitic. Zircon, sphene, magnetite and apatite are present as accessory minerals. Similar granitic rocks also occur in the mantle sequence of the Asbestos and Thetford-Mines ophiolites (Laurent, Taner and Bertrand, 1984; Clague, Frankel and Eaby, 1985; Whitehead, Dunning and Spray, 2000), and have been interpreted as anatectic granitic magmas generated by shear-related partial melting of continental margin sediments during the obduction of the oceanic crust onto Laurentia (e.g. Whitehead, Dunning and Spray, 2000).

2.4.2.3 Volcanic rocks

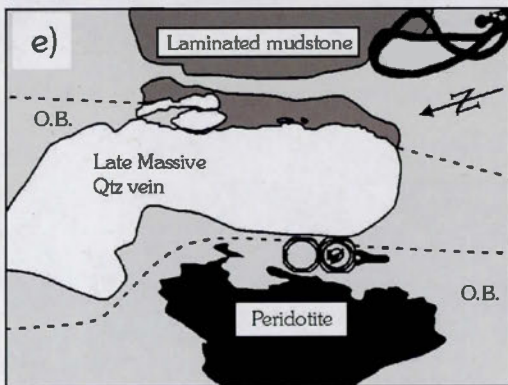
Volcanic rocks of the Lac-Brompton ophiolite form a thin (150 metres thick) unit of mafic flow breccias interbedded with pillowed (fig. 2.3c) and massive lava flows or volcanoclastic

rocks. These volcanic rocks are commonly variolitic and vesicular (with locally up to 20% vesicles). They contain microphyric diopsidic clinopyroxenes ($\text{Wo}_{48}\text{En}_{39}\text{Fe}_{13}$; Mg# 75-78) rimed or replaced by acicular actinolite. The vesicles are filled by calcite or an assemblage of albite – epidote – chlorite. The fine-grained mineral groundmass consists of actinolite, chlorite, albite, calcite and minor epidote, a mineral paragenesis that is obviously typical of greenschist-grade metamorphism in mafic rocks. Traces of pyrite, chalcopyrite and chrome-rich spinel are also found.

2.4.3 Supra-ophiolitic sedimentary rocks

The sedimentary rock sequence overlying the Lac-Brompton ophiolite belongs to the Saint-Daniel Mélange (Schroetter *et al.*, 2006) and can be separated into two distinctive assemblages on the basis of contrasting sedimentary facies and lithologies. The first assemblage is less than 250 metres thick and consists of finely-laminated and interlayered red to green-grey mudstones/siltstones and cherts. This unit locally directly overlies the mantle peridotites (fig. 2.3d and 2.3e) and occurs mostly in the northern part of the ophiolite. The second sedimentary assemblage consists of polymict conglomerates interpreted as debris flows containing centimetric to pluri-decimetric clasts of various types of peridotites, pyroxenites, gabbros, granitoides, basalts and sedimentary rocks embedded in a sandstone/siltstone, chlorite-rich matrix (fig 2.3f). It is locally entirely made up of clasts of ultramafic rocks in a serpentine – talc – carbonate matrix. Such debris flows overly various parts of the Lac-Brompton ophiolite, including its metamorphic sole and mantle section (Daoust *et al.*, 2005). This assemblage grades upward into a sequence of interlayered black siltstones-sandstones, conglomerates and pebbly mudstones typical of the Saint-Daniel Mélange (Schroetter *et al.*, 2006). These relationships and field observations imply that, in the Lac-Brompton area, the base of the Saint-Daniel Mélange represents a major erosional surface cutting deeply into the mantle and the metamorphic sole of the ophiolite.

Figure 2.3 : Photograph of a) upper mantle harzburgite exhibiting dunitic bands which could be transposed dykes; b) pyroxenite dyke with boninitic geochemical affinities crosscutting upper mantle harzburgite and characterized by harissitic margins; c) typical boninitic pillow lava of the Lac-Brompton ophiolite, tops are to the north; d) erosional unconformity between altered peridotite (serpentine-tremolite-calcite-chromite) and laminated mudstones of the Saint-Daniel Mélange; e) sketch detailing important features of figure 2.3d; f) polymict debris flow containing clasts of gabbro, plagiogranite, basalt and pyroxenite embedded in a chlorite-rich matrix, typical of the basal conglomeratic sedimentary rocks of the Saint-Daniel Mélange. All photographs are localized on figure 2.2.



2.5 Geochemistry

2.5.1 Analytical methods

Twenty-three samples were analyzed (appendix A) at the Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-ETE). Major elements, Ba, Co, Cr, Ni, Cu, Sc, Sr, and V were analysed by ICP-AES (Optima 3000) whereas Y, Zr, Nb, Hf, Ta, Th, U, Pb, Rb, Cs and Rare Earth Element (REE) concentrations were determined by ICP-MS (Vg-PQ2). Mineral chemistry analyses were performed at McGill University, using a JEOL 8900 microprobe. Samples showing macroscopic evidence for intense carbonatisation or silicification were not analyzed. Analysed samples have undergone only moderate chloritization and MgO values are considered to be near-primary. Ti, Zr, Hf, Th, Nb, Ta, REE, Cr, V, Ni, Co, Sc and Y are commonly believed to remain stable during oceanic and low-grade regional metamorphism (Menzies, Blanchard and Jacobs, 1977; Humphris and Thompson, 1978a, 1978b) and will be used here for the interpretation of geochemical characteristics. In the following section, geochemical results of the Lac-Brompton ophiolite are presented in inverse stratigraphic order, from top to bottom.

2.5.2 Volcanic rocks

On the basis of TiO_2 values, Laurent and Hébert (1989) proposed a threefold classification of ophiolitic volcanic rocks and diabbases of the southern Québec Appalachians (fig. 2.4); Group I consisting of TiO_2 -depleted, boninitic mafic volcanics, Group II of MORB and island arc tholeiites, and Group III of TiO_2 -rich alkaline basalts. Volcanic rocks of the Lac-Brompton ophiolite are typical TiO_2 -depleted (<0.19 wt%, fig. 2.4) mafic volcanic rocks belonging to Laurent and Hébert's boninitic series. They are characterized by low Al_2O_3 contents (<13 wt%), high $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ratios (60-114) and high MgO values (6.1-15.5 wt%), typical of mafic magmas generated by partial melting of a depleted mantle source.

Volcanic rocks of the Lac-Brompton ophiolite are enriched in low field strength elements (LFSE) and depleted in high field strength elements (HFSE) ($\text{Th}/\text{Nb}_{\text{mn}}$ 3-5; fig. 2.5a),

showing a clear supra-subduction zone (SSZ) affinity (Pearce, Lippard and Roberts, 1984). They were most likely generated by partial melting of a refractory mantle source, as suggested by the Cr-Y diagram (Fig. 2.6). Ti/V ratios are low (< 5) and typical of arc-related rocks (Shervais, 1982). The Lac-Brompton ophiolitic volcanic rocks are REE-depleted and chondrite-normalized profiles are either U-shaped (La/Sm_n 3-7) or show a slight depletion of LREE with La/Yb_n ratios varying between 0,2 and 0,4 (fig. 2.7a). Such REE profiles are similar to those found in modern boninites such as in the Bonin Islands (Hickey and Frey, 1982; Taylor *et al.*, 1994), the Mariana forearc region, Papua New Guinea (Hickey and Frey, 1982), and the Luzon Island (Pearce *et al.*, 1992; Hawkins, 2003). Analysed chrome-rich spinels from the Lac-Brompton boninites are TiO_2 -depleted ($< 0,16$ wt %) and have elevated Cr# (79-85), typical of boninites (Dick and Bullen, 1984; Arai, 1992; Barnes and Roeder, 2001). Clinopyroxenite dykes crosscutting the mantle unit were also plotted on figures 2.5a and 2.7a. They show similar trace element profiles that are enriched in LFSE and depleted in HFSE, their REE profiles are U-shaped and comparable to the boninites, implying that these are probably genetically related.

Basalts of unknown origin, that were sampled south of the Lac-Brompton ophiolite (see fig. 2.2 for location), are characterized by high TiO_2 (1,85-2,12 wt%; fig. 2.4) and Al_2O_3 values (14,82-15,89 wt%), and are depleted in MgO and CaO (< 4 wt% and $< 3,3$ wt%, respectively). Nb values are enriched relative to MORB abundances (Nb_{mn} ; 6,6-13,5; fig. 2.5b), whereas Ti/V ratios (36-42) are typical of MORB (20-50; Shervais, 1982). On the Cr-Y discrimination diagram they plot in the MORB compositional field (fig. 2.6). They are enriched in LREE (La/Yb_n , 2-4; La_n , 37-74) and have REE patterns similar to transitional MORB's and back-arc basin basalts (fig. 2.7b). Trace element and REE geochemistry suggests that these basalts belong to the upper volcanic unit of transitional/alkaline basalts of the Mont-Orford ophiolite (figs. 2.5b, 2.6, 2.7b). The lack of Th enrichment and negative Nb anomalies relative to N-MORB (fig. 2.5b) suggests that, in contrast to typical volcanic rocks of the Lac-Brompton ophiolite, they were generated from an enriched mantle source.

2.5.3 Gabbros, diorites and granitoids

Gabbros from the Lac-Brompton ophiolite are characterized by LREE-depleted patterns and positive Eu anomalies that are typical of plagioclase bearing cumulates (fig. 2.7c). HREE abundances vary from 1 to 4 times chondrites. Diorites have U-shaped to fractionated REE profiles (fig. 2.7c) and low TiO_2 contents (fig. 2.10).

As mentioned above, plagiogranites were distinguished from diorites and gabbros by their SiO_2 content (>56 wt%) and the presence of $>10\%$ modal quartz. Lac-Brompton ophiolitic plagiogranites are also characterized by low Al_2O_3 (13,69-16,26 wt%), elevated CaO (0,52-4,27 wt%), Na_2O (2,81-6,41 wt%) and K_2O (0,41-2,73 wt%) values. Negative Eu anomalies increase with decreasing Al_2O_3 contents from diorite to plagiogranite (Eu/Eu^* 0,48-1,78; Al_2O_3 13,7-18,5 wt%), which is consistent with plagioclase fractionation. When compared to ocean-ridge granites and volcanic arc granites, they are depleted in HREE, HFSE and show Th enrichment relative to Nb (figs. 2.8a and 2.9a). Such geochemical profiles are very similar to those shown by plagiogranites of the Thetford-Mines ophiolite (fig. 2.8a). Plagiogranites from the Lac-Brompton ophiolite have an overall low REE content and fractionated REE profiles (La/Sm_n 3-5; fig. 2.7d). Figure 2.10 show that plagiogranites of the Lac-Brompton ophiolite follow a low Ti fractionation trend similar to associated boninites.

Two-mica granites of the Lac-Brompton ophiolite have compositions ranging from monzogranite to granite (*sensu stricto*). They are peraluminous with high values of SiO_2 ($>71,5$ wt%) and K_2O ($>4,4$ wt%), similar to continental granophyres. These granitoids have trace element profiles (HFSE, LFSE and REE) almost identical to peraluminous (ca. 470 Ma) granitoides crosscutting the mantle sequence of the Thetford-Mines ophiolite (figs. 2.7d and 2.8b), which have been attributed to obduction-related shear heating and partial melting of the overthrust continental margin (Whitehead, Dunning and Spray, 2000; Tremblay and Castonguay, 2002).

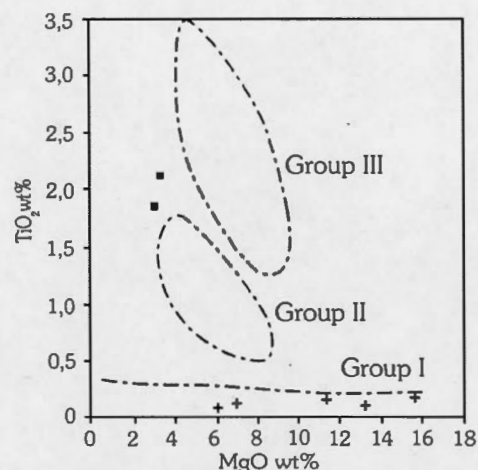


Figure 2.4 : TiO_2 - MgO variations diagram for Lac-Brompton boninites (crosses) and Mont-Orford ophiolite volcanic rocks (black squares; this study); Dot-stippled compositional fields for southern Québec ophiolitic volcanic rocks and diabases are from Laurent and Hébert (1989).

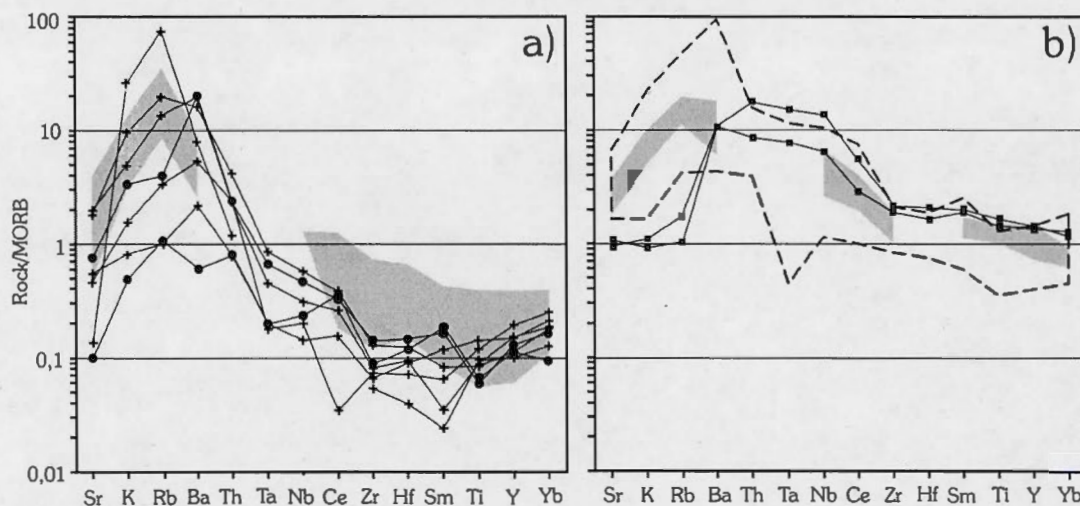


Figure 2.5 : MORB-normalized spider diagram for the a) Lac-Brompton boninites (crosses), pyroxenite dykes (black dots) and the South Pacific boninites (grey field; Hickey and Frey, 1982; Taylor *et al.*, 1994); b) Mont-Orford ophiolite volcanic rocks (filled squares, this study), transitional MORB's of the Bouvet Triple Junction (grey field; Le Roex *et al.*, 1985) and back-arc basin basalts (stippled field; Gribble, *et al.*, 1998; Leat, *et al.*, 2000). Data normalized to values of Sun and McDonough (1989).

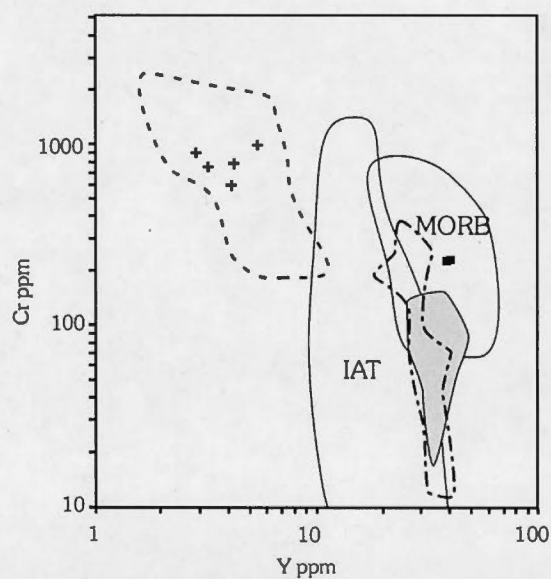


Figure 2.6 : Cr-Y tectonic discrimination diagram (Pearce, 1982) for the Lac-Brompton boninites (crosses) and Mont-Orford volcanic rocks (this study; filled squares), the South Pacific boninites (stippled field; Hickey and Frey, 1982; Taylor, *et al.*, 1994), back-arc basin basalts (dot-stippled field; Leat, *et al.*, 2000) and Mont-Orford upper volcanic unit and late-stage dykes (grey field; Huot, Hébert and Turcotte, 2002).

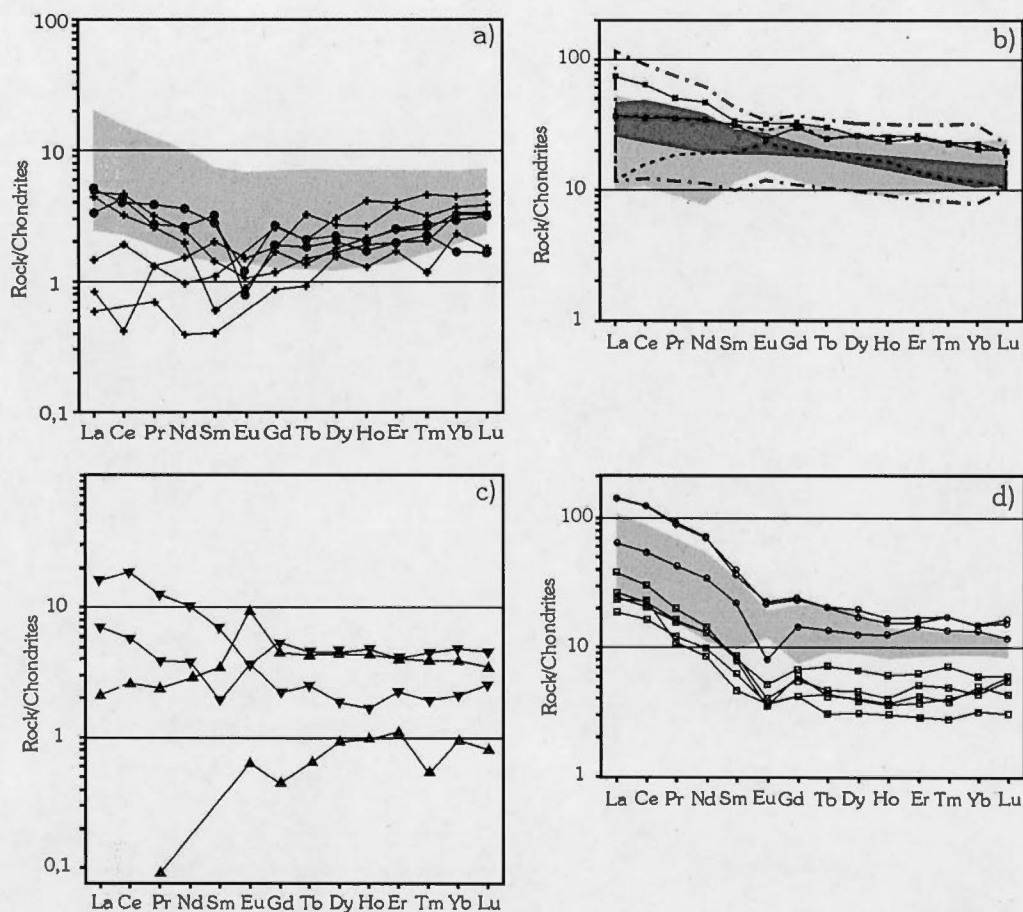


Figure 2.7 : Chondrite-normalized REE diagram for the a) Lac-Brompton boninites (crosses) and pyroxenite dykes (filled circles), grey field for the South Pacific boninites (Hickey and Frey, 1982; Taylor, *et al.*, 1994); b) Mont-Orford ophiolite volcanic rocks (this study; filled squares), back-arc basin basalts (dot-stippled field; Gribble *et al.*, 1998; Leat *et al.*, 2000), Mont-Orford ophiolite upper volcanic rocks and late-stage dykes (dotted field; Harnois and Morency, 1989; Huot, Hébert and Turcotte, 2002) and Transitional MORB's of the Bouvet Triple Junction (grey field Le Roex, *et al.*, 1985); c) Lac-Brompton gabbros (upright filled triangles) and diorites (upside down triangles); d) Lac-Brompton plagiogranites (empty squares), two-mica granites (empty circles), and Thetford-Mines ophiolites peridotite-hosted granitoids (grey field; Whitehead, Dunning and Spray, 2000). Normalizing values are from Sun and McDonough (1989).

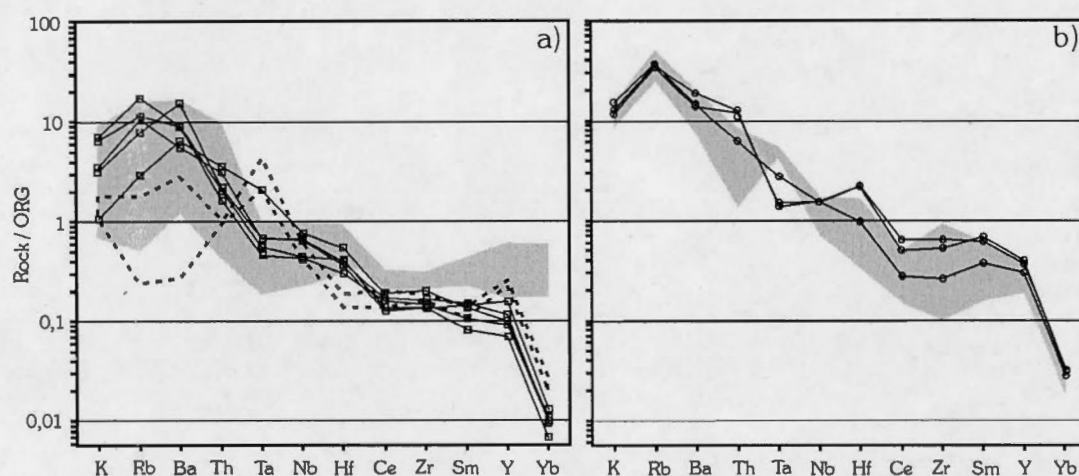


Figure 2.8 : ORG-normalized trace element diagram for the a) Lac-Brompton plagiogranites (empty squares), volcanic arc granites (grey field; Pearce, Harris and Tindle, 1984) and Thetford-Mines ophiolite plagiogranites (stippled field; Whitehead, Dunning and Spray, 2000); b) Lac-Brompton two-mica granites (empty circles), quartz monzodiorites and tonalites (empty squares), and Devonian diorites (empty diamonds) and Thetford-Mines ophiolite peridotite-hosted granitoids (grey field; Whitehead, Dunning and Spray, 2000). Values used for normalization are ocean-ridge granites of Pearce, Harris and Tindle (1984).

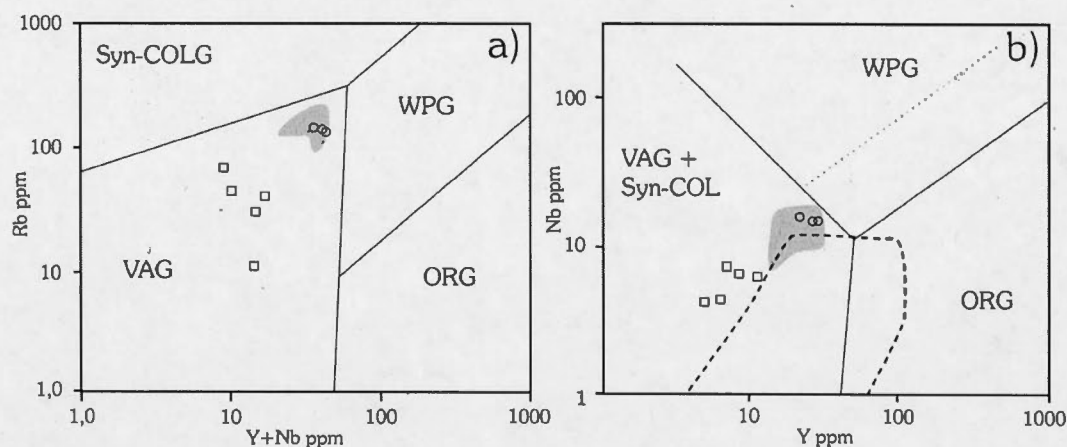


Figure 2.9 : Trace element discrimination diagrams for the Lac-Brompton plagiogranites (empty squares), two-micas granites (empty circles; plotted samples have > 56% SiO₂) and Thetford-Mines ophiolite peridotite-hosted granitoids (grey field; Whitehead, Dunning and Spray, 2000); a) Rb vs Y+Nb; b) Nb vs Y; The dotted compositional field is for forearc-related granitic rocks from the Thetford-Mines (Olive, Hébert and Loubet, 1997; Whitehead, Dunning and Spray, 2000), Antalya, Vourinos, Troodos and Oman ophiolites (Pearce, Harris and Tindle, 1984).

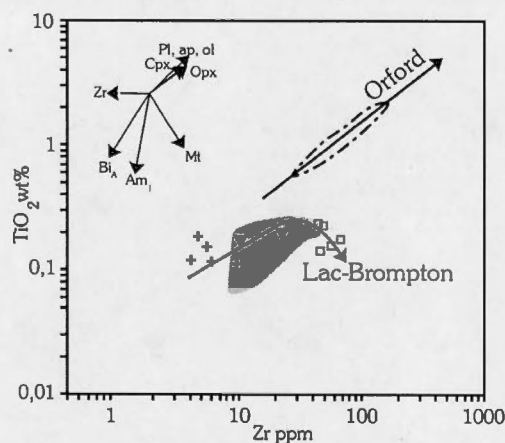


Figure 2.10 : TiO₂-Zr diagram for the Lac-Brompton boninites (crosses), diorites (up-side down triangles) and plagiogranites (empty squares), and Mont-Orford ophiolite volcanic rocks (dot-stippled field; Harnois and Morency, 1989); inferred fractionation trends are indicated by arrows. A grey compositional field for a suite of boninite - andesite - dacite - rhyolite from Chichijima, Bonin islands (Taylor, *et al.*, 1994) is shown. Arrows in the upper left corner are for mineral fractionation trends (I: intermediate composition; A: acid composition; Pearce and Norry, 1979).

2.6 Discussion

Data regarding the stratigraphy of the Lac-Brompton ophiolite, its geochemical characteristics and relationships with the overlying Saint-Daniel Mélange can be used to propose new interpretations on the origin and the extent of the different massifs that make up the Southern Québec ophiolite Belt. The most significant features of the Lac-Brompton ophiolite are the following: 1- it is mostly made up of upper mantle peridotites discontinuously overlain by boninitic volcanic rocks and/or sedimentary rocks, and 2- there is a major erosional unconformity at the base of the overlying sedimentary sequence (the Saint-Daniel Mélange), cutting deep into the mantle sequence and the underlying metamorphic sole. Our structural and stratigraphic analysis of the Lac-Brompton ophiolite, together with a well-defined boninitic affinity of its magmatic rocks, demonstrates that it does not represent an ophiolitic mélange genetically-related to the Mont-Orford ophiolite. It is rather interpreted as an exhumed segment of an ocean-floor crustal and mantle sequence with geochemical and stratigraphical features very similar to both the Asbestos and Thetford-Mines ophiolites.

2.6.1 The Lac-Brompton ophiolite as the remnant of forearc oceanic lithosphere

Supra-subduction zone (SSZ) mafic magmas have petrogenetic characteristics that can be used to distinguish them from magmatic rocks formed at Atlantic-type ocean-ridges or in a within-plate setting. Two principal distinctive components have been invoked to account for the genesis of SSZ magmas (1) a depleted mantle source accounting for low HFSE and REE values and (2) the contribution of subduction-related dehydration and devolatilization of the subducted plate, accounting for the significant amount of volatiles and large ionic radius lithophile elements characterizing such magmas (Hickey and Frey, 1982; Pearce, Lippard and Roberts, 1984; Ellam and Hawkesworth, 1988; McCulloch and Gamble, 1991; Stern *et al.*, 1991; You *et al.*, 1996; Bédard, 1999). Boninites are volcanic rocks that are characteristic of SSZ ophiolites; in modern settings, boninites are most frequently found in forearc regions (Hawkins *et al.*, 1984; Stern and Bloomer, 1992; Hawkins, 2003). Typically, modern boninites are TiO_2 -, REE- and HFSE-depleted and have high MgO and SiO_2 contents (Crawford, Beccaluva and Serri, 1981; Hickey and Frey, 1982; Tatsumi and Maruyama,

1989; Stern *et al.*, 1991; Taylor *et al.*, 1994; Bédard, 1999). Low values of Y, Ti, REE and high values of Cr, relative to typical island arc tholeiites (IAT) and MORB's, suggests that these volcanic rocks are generated by partial melting of a depleted harzburgitic mantle in response to an influx of LFSE and volatiles from the subducted slab.

Our data on the geochemistry of volcanic rocks of the Lac-Brompton ophiolite shows that TiO_2 -, REE- and HFSE-depleted boninites are predominant here. Intrusive rocks associated with the mafic extrusives also appear to have a boninitic affinity, suggesting that the crustal sequence of the Lac-Brompton ophiolite is related to a boninitic magmatic system. Ultramafic dykes show boninitic-like geochemical features: they are REE-depleted and characterized by U-shaped REE profiles. Low values of Al_2O_3 , K_2O and high Na_2O and CaO contents and trace element characteristics of plagiogranites of the Lac-Brompton ophiolite are best explained by low pressure fractionation of a low-Ti mafic magma. This series of geochemical features indicates that the Lac-Brompton ophiolite likely represents the remnant of SSZ forearc oceanic lithosphere, which sharply contrasts with the overall composition of the adjacent Mont-Orford ophiolite, mainly made up of IAT, MORB's and alkaline basalts (e.g. Harnois and Morency, 1989; Hébert and Laurent, 1989; Huot, Hébert and Turcotte, 2002). The lithological assemblage and geochemical signature of the Lac-Brompton ophiolite are, however, almost identical to the Thetford-Mines and Asbestos ophiolites. As was suggested by Schroetter *et al.* (2005), on the basis of structural arguments, we would like to emphasize here the fact that the geochemistry of the Lac-Brompton ophiolite is consistent with its correlation with the Thetford-Mines ophiolite. It represents the southwestern extremity of a composite oceanic slab (mostly formed by the Asbestos and Thetford-Mines ophiolites) consisting of forearc sea-floor.

2.6.2 Is the Lac-Brompton ophiolite the remnant of an oceanic core complex?

Modern slow-spreading oceanic ridge segments (typified by the Mid-Atlantic Ridge MAR, Juteau and Maury, 1999), are characterized by short-lived magma chambers and a locally discontinuous crustal sequence crosscut by a well-developed network of low- and high-angle normal faults. To the latter are occasionally related major debris flows and the exhumation of

the oceanic lower crust and/or upper mantle (Tucholke, 1992; Tucholke, Lin and Kleinrock, 1998) along a very wide (up to 10 km) and deep axial valley (Macdonald, 1982; Juteau and Maury, 1999). Along the MAR, the tectonic exhumation of the lower crust-upper mantle rocks leads to the formation of oceanic core complexes (i.e. megamullions of Tucholke, Lin and Kleinrock, 1998), commonly located at, or close to, ridge-transform intersections (Mutter and Karson, 1992; Blackman *et al.*, 1998, 2002; Tucholke, Lin and Kleinrock, 1998; Ranero and Reston, 1999; Macloed *et al.*, 2002). Oceanic spreading and accretion are commonly accommodated by progressive shearing along detachment and high-angle normal faults culminating with intermittent episodes of magmatism, which accounts for the occurrence of gabbros crosscutting undeformed to mylonitized peridotites at modern ocean-ridges (Cannat, 1993; Durand *et al.*, 1996), as well as in several Alpine and Balkan ophiolites (Dilek and Delaloye, 1992; Dilek and Eddy, 1992; Lagabrielle and Lemoine, 1997; Nicolas, Boudier and Meshi, 1999).

The Thetford-Mines ophiolite has been recently interpreted as the remnant of an oceanic crust formed in a slow-spreading ridge environment (Schroetter *et al.*, 2003; Tremblay *et al.*, 2006). The detailed mapping of syn-magmatic structures in the Thetford-Mines ophiolite (Schroetter *et al.*, 2003; Tremblay *et al.*, 2006) indicates that ophiolitic crustal rocks were affected by normal-sense block faulting during their formation. Normal faults are marked by abrupt lateral variations in the thickness and nature of crustal assemblages and by ultramafic-to-mafic intrusions and dykes crosscutting cumulative peridotites and overlying gabbros. Normal faulting appears to be locally related to the exhumation of the crust and mantle of the Thetford-Mines ophiolite, as suggested by the occurrence of sedimentary rocks of the Saint-Daniel Mélange directly overlying crustal gabbros or mantle harzburgites (Pagé, 2006; Tremblay and Bédard, 2006). However, a major syn-oceanic detachment, if preserved, has not been found yet. In comparison to both the Thetford-Mines and Asbestos ophiolites, the Lac-Brompton ophiolite appears to have been more profoundly eroded. Its highly disturbed stratigraphy (i.e. abundant intrusions crosscutting the mantle; a thin and discontinuous volcanic cover), together with the occurrence of a major erosional unconformity at the base of the Saint-Daniel Mélange, suggests that the Lac-Brompton ophiolite may represent an exhumed segment of oceanic mantle occurring at the southern (present coordinate) extremity

of a composite (Thetford-Mines – Asbestos – Lac-Brompton; TMALB) oceanic slab. Tremblay (1992) suggested that N-S-trending magnetic anomalies, located between the Lake Massawippi fault zone (Tremblay and Malo, 1991) and the Lac-Brompton ophiolite, possibly represent the vestige of a pre-obduction oceanic fracture zone (transform fault or ridge-transform intersection?) in the Southern Québec Dunnage zone. It is interesting to note that the location of the inferred oceanic fracture is consistent with an oceanic core complex interpretation for the Lac-Brompton ophiolite and corresponds almost perfectly with the southern extremity of the TMALB slab. This inferred fracture zone may account for (1) the transition from ca. 480 Ma, boninitic crust and mantle of the TMALB slab to the northeast, to a ca. 504 Ma oceanic crust made up of MORB's, IAT and transitional-alkaline basalts of the Mont-Orford ophiolite to the southwest, and (2) the formation of oceanic core complexes in areas adjacent to the fracture zone. Segment tips of slow-spreading ridges (i.e. ridge-transform intersections) have a lower magma budget than segment centers and seafloor spreading is often accommodated by amagmatic vertical tectonics rather than by the formation of new seafloor (Tucholke and Lin, 1994; Blackman *et al.*, 1998; Tucholke, Lin and Kleinrock, 1998). Moreover, most oceanic core complexes, such as the Atlantis Massif (Blackman *et al.*, 1998, 2002; Baines *et al.*, 2003; Nooner *et al.*, 2003), occur at inside corners of ridge-transform intersections, where the movement between two blocks is in opposite directions.

2.6.3 The Lac-Brompton ophiolite – a synthetic model

Our interpretation regarding the origin of the Lac-Brompton ophiolite and implications for the Southern Québec ophiolite Belt are influenced by existing models for the Southern Québec and northern New England Appalachians, which involve the accretion and collision of oceanic terranes (i.e. the Dunnage zone) with the irregular Laurentian continental margin (Cawood and Suhr, 1992; Tremblay, 1992; Kim and Jacobi, 2002; Pinet and Tremblay, 1995b; van Staal *et al.*, 1998, among many others). It was inferred by Kim and Jacobi (2002) and Huot, Hébert and Turcotte (2002), that east-directed (present coordinates) subduction of the Laurentian margin started in Late Cambrian times (fig. 2.11a), prior to the formation of supra-subduction zone (504 ± 3 Ma; David and Marquis, 1994) trondhjemites of the Mont-

Orford ophiolite. These crosscut the remnants of a volcanic arc basement preserved as a sheeted dyke and sill complex and part of the lower volcanic sequence of the Mont-Orford ophiolite (Huot, Hébert and Turcotte, 2002). As subduction proceeded, the impingement of the Laurentian continental margin with the volcanic arc at promontories slowed down the rate of plate convergence and induced trench retreat, slab rollback and extension in the overriding SSZ lithosphere (Cawood and Suhr, 1992). We propose that this promoted the formation of ca. 480 Ma oceanic lithosphere in the Quebec reentrant along a slow-spreading ridge within a marginal basin in a forearc setting (fig. 2.11b), remnants of which are now preserved as the TMALB slab. Along this slow-spreading ridge, the mantle rocks of the Lac-Brompton ophiolite were exhumed up to seafloor level and formed an oceanic core complex (fig. 2.11c), likely similar to well-documented core complexes characterizing slow-spreading ridges in modern oceans, for instance, the MAR Atlantis Massif (Blackman *et al.*, 1998, 2002; Baines *et al.*, 2003; Nooner *et al.*, 2003; Kelley *et al.*, 2005). Arc volcanism is generally considered to be triggered by the devolatilization of the subducted slab and fluid efflux into the mantle wedge (Tatsumi, 1989). Newly-focused devolatilization of the subducting slab, caused by the change in geometry of the subduction zone, potentially contributed to partial melting of the depleted oceanic mantle wedge, as suggested by Bédard *et al.* (1998) for the formation of the Betts Cove ophiolite boninitic crustal sequence. Magma supply was sufficient to generate a complete boninitic crustal sequence in both the Thetford-Mines and Asbestos ophiolites, whereas due to the predominance of extension, only a limited amount of crustal rocks were formed in the Lac-Brompton ophiolite. The occurrence of conglomeratic debris flows overlying the harzburgite and metamorphic rocks belonging to the tectonic sole of the Lac-Brompton ophiolite, implies that this ophiolitic massif was uplifted and deeply eroded during or shortly after its obduction (Taconian orogeny), as suggested by Schroetter *et al.* (2006) for correlative debris flows overlying the ophiolitic substrate of the Thetford-Mines ophiolite.

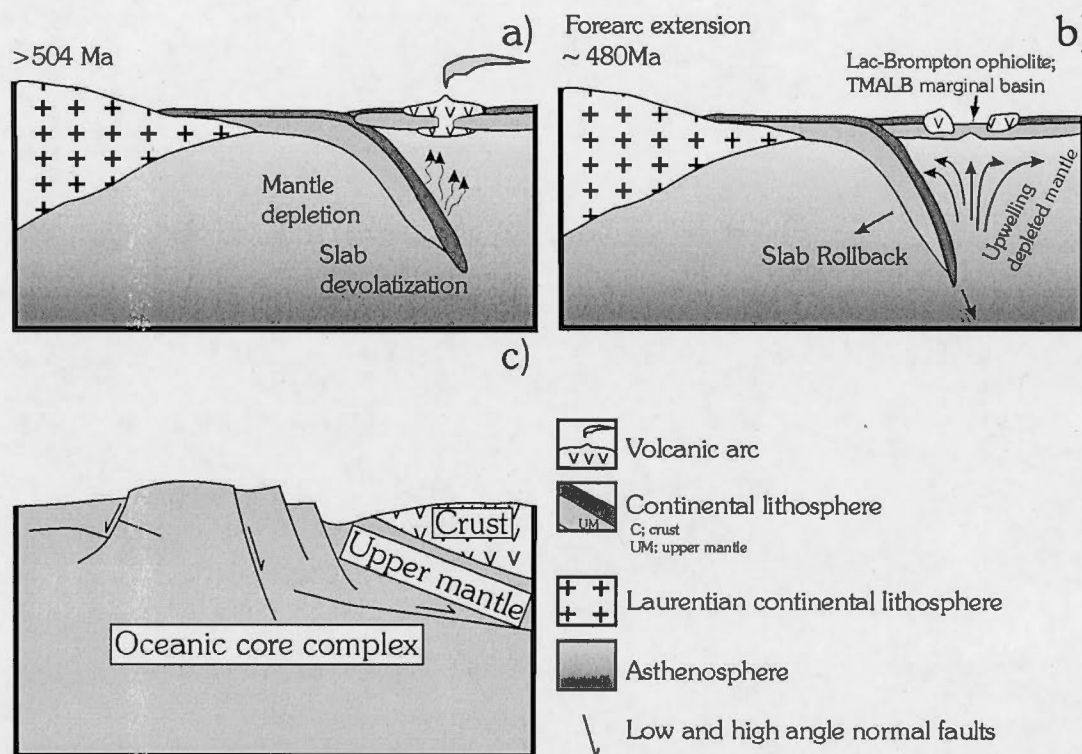


Figure 2.11 : Tectonic model of the Lac-Brompton ophiolite; a) East-dipping subduction zone and immature arc crust formation (preserved as the dyke and sill complex and part of the lower volcanic unit of the Mont-Orford ophiolite); b) Formation of a ca. 480 Ma marginal basin in a forearc setting; c) Exhumation and erosion of the Lac-Brompton ophiolite mantle peridotites in an oceanic core complex.

2.7 Concluding remarks

Field data and geochemical characteristics we have brought forward concerning the Lac-Brompton ophiolite highlight geological evidence for its formation along an ocean-ridge segment that we correlate with the Thetford-Mines and Asbestos boninitic crustal and mantle sequences. The Lac-Brompton ophiolite is however characterized by an ophiolitic stratigraphy that is dominated by strongly serpentinized upper mantle peridotites and a discontinuous crustal sequence partly made up of REE-depleted, low-Ti boninitic volcanic rocks that were formed in a supra-subduction zone environment, most likely in a forearc marginal basin. Stratigraphic and lithological evidence, such as the observation of depositional contacts in several sites, the occurrence of opicalcites and the pervasive alteration of mantle peridotites, indicate a major erosional unconformity at the contact between the Lac-Brompton ophiolite and the overlying Saint-Daniel Mélange. The occurrence of deep-water marine strata and pillowed volcanic rocks directly overlying the mantle peridotites, and the presence of a rather discontinuous crustal sequence, suggests that the mantle and/or the deepest part of the crust were exhumed to form an oceanic core complex, most likely before the onset of renewed boninitic magmatism. We suggest that this ophiolitic massif represents an exhumed segment of a composite oceanic slab discontinuously exposed between the Thetford-Mines area (to the north) and the Lac-Brompton area to the south. Existing geochronological constraints suggest that this oceanic slab was formed within 20 m.y. after the rifting of a volcanic arc that is partly preserved in the Mont-Orford ophiolite. The proximity of the Lac-Brompton ophiolite to a paleo-transform could account for its deeper level of syn-oceanic (?) erosion, tectonic exhumation and unusual stratigraphy, when compared to more complete ophiolites, such as the Thetford-Mines complex.

2.8 Acknowledgements

This paper represents part of the first author's M.Sc. thesis undertaken at Université du Québec à Montréal. The first author would like to thank family and friends for their support and encouragements. Acknowledgements are also due to J.H. Bédard of the Geological Survey of Canada and R. Stevenson of the Université du Québec à Montréal who contributed

to the improvement of the manuscript. The National Science and Engineering Research Council (NSERC) is also acknowledged for operating grants to A. Tremblay (NSERC, PG-105699) and M. Gauthier (NSERC, 2631-02).

CHAPITRE III

GÉOLOGIE STRUCTURALE

Le présent chapitre contient des éléments complémentaires au manuscrit du chapitre II. Il présente une synthèse des éléments structuraux observés au cours des cheminements sur le terrain et les conclusions qui ont permis de produire la carte géologique de l'appendice A.

3.1 Structures observées

Les travaux antérieurs de géologie structurale dans les Appalaches du sud du Québec (voir chapitre II) ont permis d'établir un modèle de la structuration de la croûte océanique avant, pendant et après son obduction (Schroetter, Tremblay et Bédard, 2005). Le présent chapitre est divisé en sous-sections détaillant les éléments structuraux observés et associés à ces événements pré-, syn- et post-obduction. Les structures sont présentées en ordre chronologique, lequel est basé sur des relations de recoupement observées sur le terrain. La nomenclature des fabriques syn- à post-obduction utilisée dans ce mémoire : S_{1-2} , S_3 et S_4 , est celle de Tremblay et Pinet (1994) pour les roches métamorphique de la zone de Humber interne, également utilisée par Schroetter, Tremblay et Bédard (2005) dans la région de Thetford-Mines. La fabrique S_{1-2} est une foliation ou un clivage associé à l'obduction et la mise en place de l'ophiolite sur la marge continentale lors de l'orogénie taconienne. La fabrique S_3 est un clivage développé lors d'une phase de rétrochevauchement du Silurien Supérieur/Dévonien Inférieur, tandis que la phase D_4 est liée à l'orogénie acadienne du Dévonien Moyen.

La fabrique la plus ancienne (pré-obduction) est la foliation mantellique, elle est donc restreinte aux péridotites du manteau. La schistosité associée à l'obduction de l'ophiolite sur la marge continentale est essentiellement développée dans les roches métamorphiques de la

semelle tectonique (S_{1-2} ; Daoust, De Souza et Tremblay, 2006) ou de la marge continentale sous-jacente (Schroetter, Tremblay et Bédard, 2005). Les phases de déformation post-obduction D_3 et D_4 sont développées dans l'ophiolite, les roches métamorphiques sous-jacentes et le Mélange de Saint-Daniel:

3.2 Foliation de la péridotite mantellique

Les péridotites du manteau sont essentiellement représentées par de la harzburgite serpentinisée. Elles sont caractérisées par une foliation de haute température, celle-ci est accompagnée d'une linéation marquée par l'allongement des porphyroclastes d'orthopyroxène. La foliation est localement marquée par un litage compositionnel souligné par l'alternance de rubans dunitiques (fig. 2.3a). Ces types de structures ne se développent qu'aux conditions de pressions et températures du manteau (Nicolas, 1989). Dans la région d'étude, ces structures sont obscurcies par la serpentinitisation complète des minéraux primaires, i.e. l'olivine et l'orthopyroxène.

3.3 Fabrique d'obduction

Lors de l'obduction, les roches ophiolitiques n'ont pas été fortement affectées par la déformation ou le métamorphisme associé. Seule la harzburgite mantellique a enregistré cette phase de déformation, exclusivement dans une zone de faible épaisseur (<25 m) à la base de l'ophiolite, située à proximité de la semelle tectonique. Dans cette zone, la harzburgite passe à une serpentinite cisailée dont la fabrique (S_{1-2}) est sub-parallèle au contact avec les roches de la semelle tectonique (fig. 3.1). La fabrique S_{1-2} est plissée par S_3 et S_4 , elle est attribuée à la mise en place de l'ophiolite sur la marge continentale.

3.4 Structures post-obduction

Afin de faire ressortir le patron structural préservé dans la région du lac Brompton, le terrain à l'étude a été divisé en trois domaines structuraux limités par des changements d'attitude de S_0 et de S_3 , ceux-ci sont identifiés sur la carte de l'appendice A. Le clivage acadien (S_4) est la

fabrique dominante dans la région du lac Brompton, il a une orientation uniforme sur l'ensemble du terrain à l'étude et dans chacun des domaines structuraux. Dans le Mélange de Saint-Daniel, cette fabrique est un clivage sub-vertical ($75-90^{\circ}$) orienté N-S à NE-SO (fig. 3.2 et 3.3a). Dans les péridotites, la fabrique S_4 s'exprime sous forme de zones de cisaillement verticales, de failles inverses ou de fractures espacées. La linéation d'intersection que ce clivage définit avec la stratification, plonge vers le NNE ou le SSO (fig. 3.3b). La surface axiale du pli anticlinal régional est parallèle à l'orientation de S_4 . La figure 3.4 illustre le style structural de la déformation acadienne dans la région du lac-Brompton.

3.4.1 Domaine structural I

Le domaine I (voir appendice A) occupe la partie ouest du terrain à l'étude (flanc ouest du pli régional) et est limité à l'ouest par une zone de faille corrélée avec la faille St-Joseph/ligne Baie Verte-Brompton (voir plus bas). Dans ce secteur, le clivage S_3 est d'orientation NE-SO et pente fortement vers le NO (fig. 3.5). L'angle entre les clivages S_3 et S_4 est faible ($<25^{\circ}$) et la relation angulaire entre les deux fabriques suggère la présence d'une charnière antiforme (P_4) à l'est. La cinématique de la zone de faille située à l'ouest du terrain à l'étude, entre le Groupe de Caldwell (zone de Humber) à l'ouest et les roches de la zone de Dunnage (extrémité sud de l'ophiolite d'Asbestos et Mélange de Saint-Daniel, voir figure 3.6) à l'est, n'a pu être clairement définie dans le secteur à l'étude. Régionalement, cette zone correspond à une importante série de failles normales, la zone de faille Saint-Joseph/ligne Baie Verte-Brompton (Tremblay et Castonguay, 2002).

3.4.2 Domaine structural II

Le domaine II est représenté par la zone de charnière du pli régional (P_4) et peut être divisé en deux sous-domaines IIa (sud) et IIb (nord). S_3 est la fabrique dominante dans le sous-domaine IIa, tandis qu'elle n'a pas été observée dans le sous-domaine IIb. Dans le sous-domaine IIa, S_3 possède une orientation NE-SO à NO-SE et un fort pendage vers le sud ou le nord (fig. 3.7a). L'angle entre les clivages S_3 et S_4 est élevé (25° à 90° ; voir figure 3.8), suggérant la présence d'une charnière de pli dans ce secteur. La linéation d'intersection L_{3-4}

plonge de 23° à 65° vers le NE ou le sud (fig. 3.7b). S_0 a un fort pendage vers le NO ou le SE (fig. 3.7c). Dans le sous-domaine IIb, la stratification a une orientation variable (fig. 3.7c). Le contact sud de l'ophiolite du Lac-Brompton est marqué par une faille présumée rétrochevauchante à pendage vers le nord, le long de laquelle l'ophiolite et sa semelle tectonique sont transportées par-dessus les roches appartenant à l'ophiolite du Mont-Orford (voir figure 3.6).

3.4.3 Domaine structural III

Le domaine III occupe le flanc est du pli régional P_4 . Dans ce secteur, l'angle entre S_3 et S_4 redevient faible ($<25^{\circ}$) et la relation de superposition S_4/S_3 indique la présence d'une charnière antiforme à l'ouest (fig. 3.2). Le clivage S_3 est orienté E-O à N-S et pente fortement vers le nord ou l'est (fig. 3.9a). La stratification est généralement d'orientation N-S et pente fortement vers l'est (fig. 3.9b). D'après la relation entre le clivage S_4 et la stratification, la présence d'une charnière anticlinale à l'ouest est suggérée.

3.5 Synthèse structurale

L'analyse des éléments structuraux de l'ophiolite du Lac-Brompton démontre que cette unité a subi une histoire structurale complexe, depuis sa formation en milieu océanique, jusqu'à la superposition de structures issues des orogénies taconienne et acadienne. Des failles normales syn-océaniques ont aussi probablement participé à la structuration de l'ophiolite, permettant une exhumation précoce des roches du manteau au niveau du plancher océanique (voir chapitre II). L'absence d'une section crustale bien préservée (cumulats mafiques – ultramafiques, complexe filonien et séquence volcanique) empêche cependant de mieux contraindre la géométrie de la déformation pré-obduction. Les structures issues de l'obduction sont exclusivement préservées au sein d'une mince bande de serpentinite mylonitique située à la base des péridotites. Deux phases de déformation post-obduction (D_3 et D_4) ont contribué au patron structural développé dans les roches ophiolitiques et sédimentaires de la région du lac Brompton. L'analyse structurale permet de mettre en évidence un motif d'interférence intermédiaire entre les types I et II de Ramsay (1967). La

phase de plissement P_3 est attribuée à un transport de l'ophiolite et des roches sédimentaires sus-jacentes vers le sud-est. La phase D_4 est essentiellement caractérisée par une déformation coaxiale, dont la contrainte principale était d'orientation ESE-ONO, elle exprime le serrage acadien des structures préexistantes. L'ophiolite du Lac-Brompton affleure donc au sein d'une fenêtre structurale située à l'intersection de charnières anticlinales des phases D_3 et D_4 .

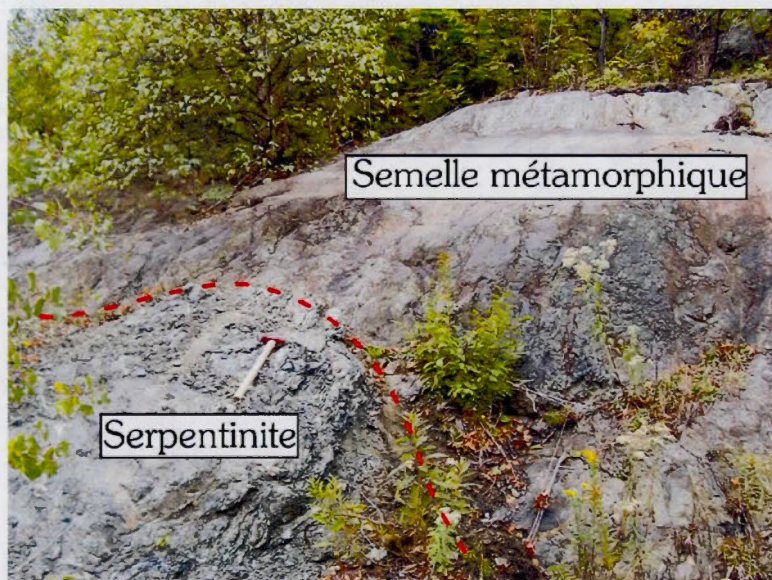


Figure 3.1 : Contact (souligné par une ligne tiretée) entre la harzburgite mantellaire et les roches métamorphiques de la semelle tectonique de l'ophiolite du Lac-Brompton.

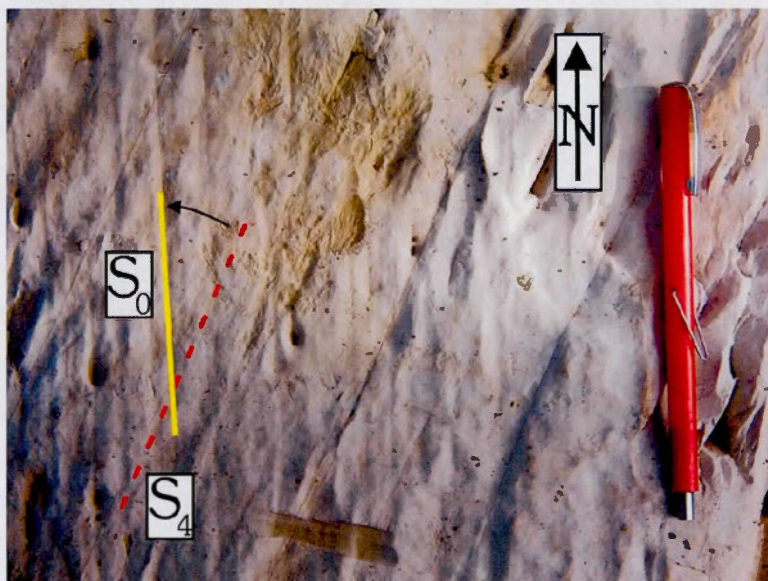


Figure 3.2 : Photo de terrain montrant la trace du clivage S_4 (rouge) et de la stratification (S_0 ; jaune) sur le flanc est du pli anticlinal régional P_4 (domaine III). La polarité sédimentaire est vers l'est.

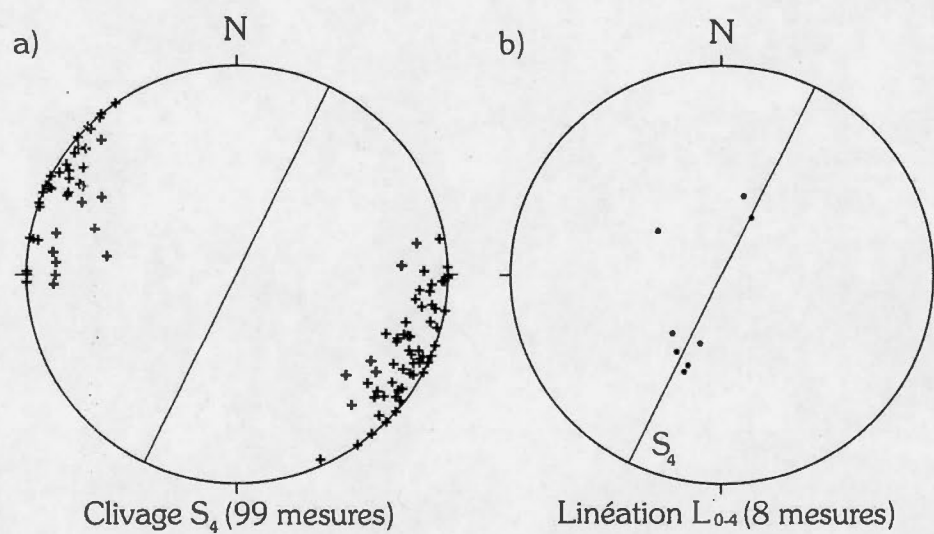


Figure 3.3: a) Pôles du clivage S_4 mesurés sur l'ensemble de la région à l'étude; b) Mesures de la linéation d'intersection $L_{0.4}$.

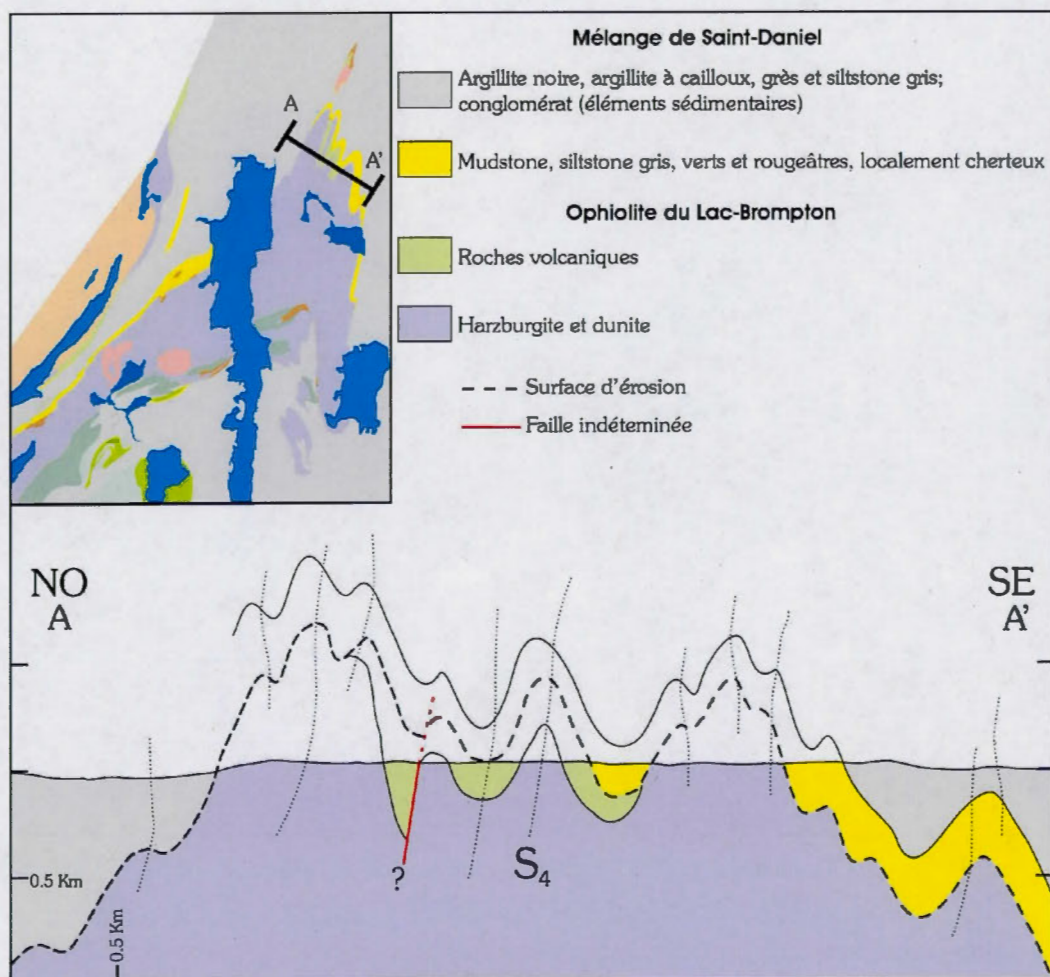


Figure 3.4 : Coupe géologique dans la partie nord de la région à l'étude (sous-domaine IIb), elle illustre les principaux éléments structuraux et relations stratigraphiques.

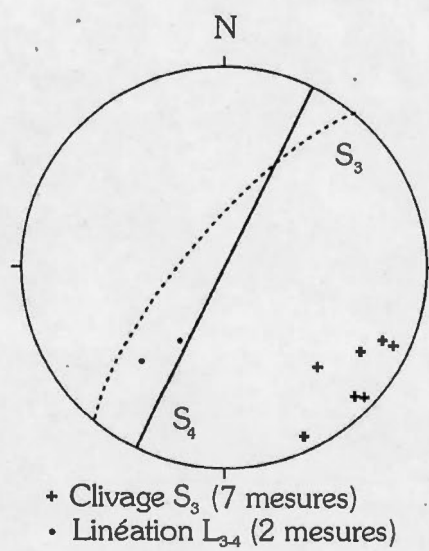


Figure 3.5 : Mesures structurales du domaine I; Pôles du clivage S_3 et la linéation L_{34} .

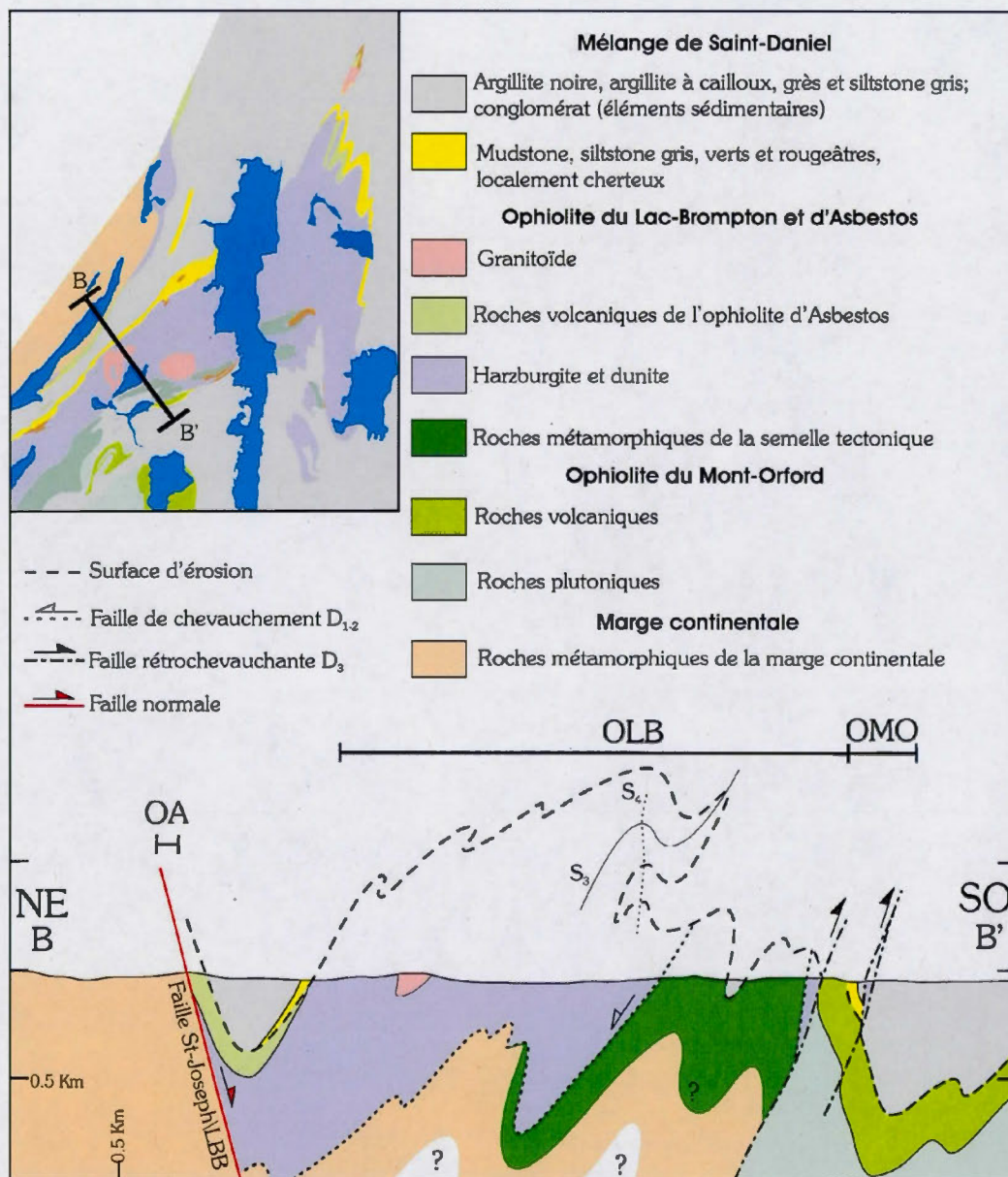


Figure 3.6 : Coupe géologique dans la partie SO de l'ophiolite du Lac-Brompton et localisée sur l'appendice A. LBB; ligne Baie Verte-Brompton; OA, ophiolite d'Asbestos; OLB, ophiolite du Lac-Brompton; OMO, ophiolite du Mont-Orford.

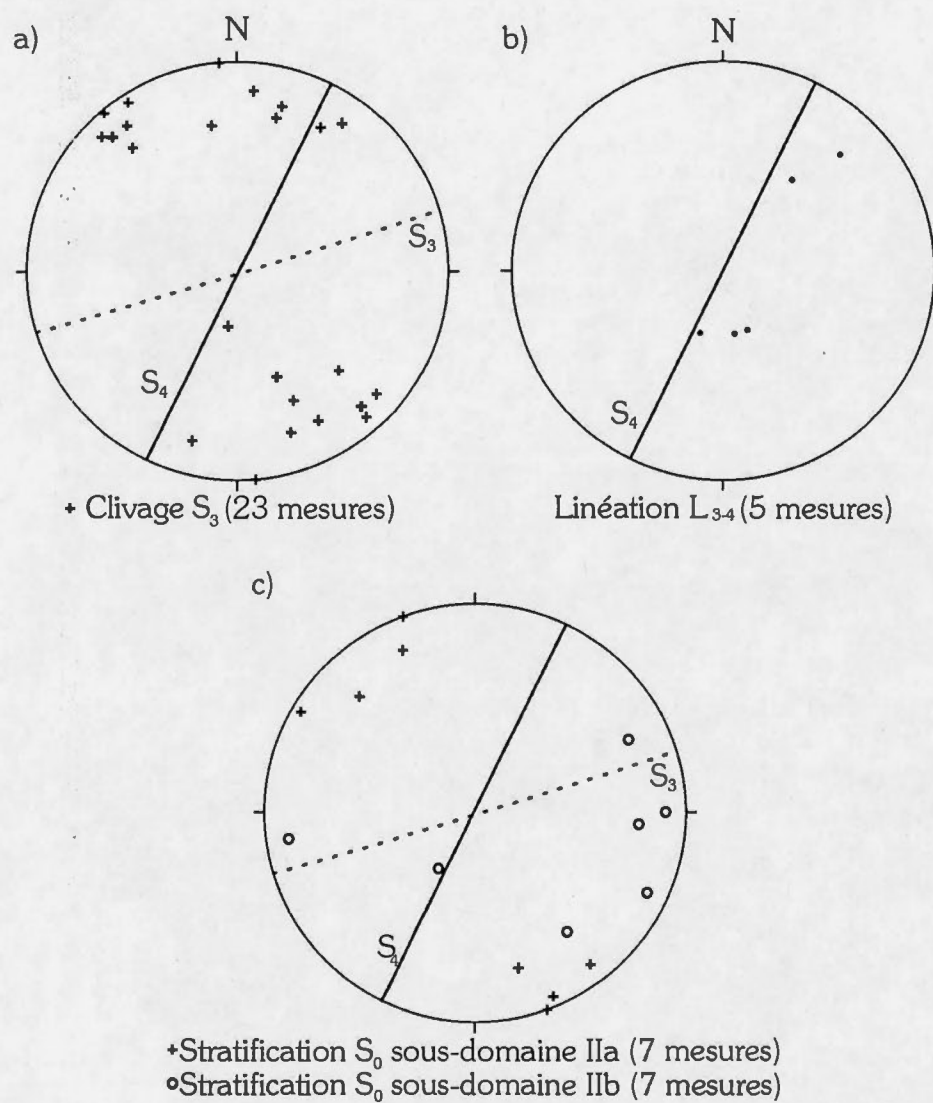


Figure 3.7 : a) Pôles du clivage S_3 dans le sous-domaine IIa; b) Linéation d'intersection L_{3-4} dans le sous-domaine IIa; c) Pôles de la stratification dans les sous-domaines IIa et IIb.

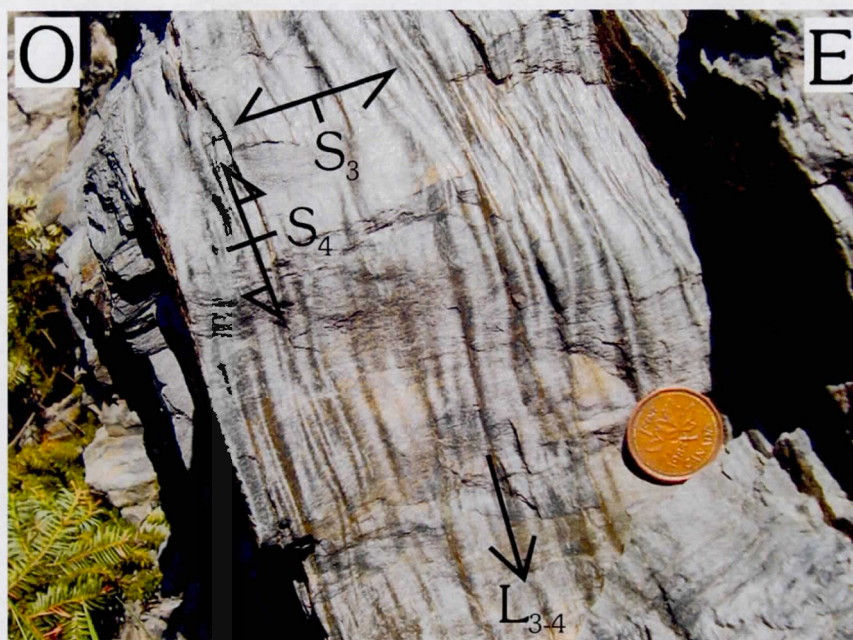


Figure 3.8 : Photo de terrain montrant un siltstone verdâtre de la base du Mélange de Saint-Daniel dans le sous-domaine IIa. Le clivage S_3 pente fortement vers le sud et est crénulé par le clivage S_4 . La linéation d'intersection L_{3-4} plonge fortement vers le sud.

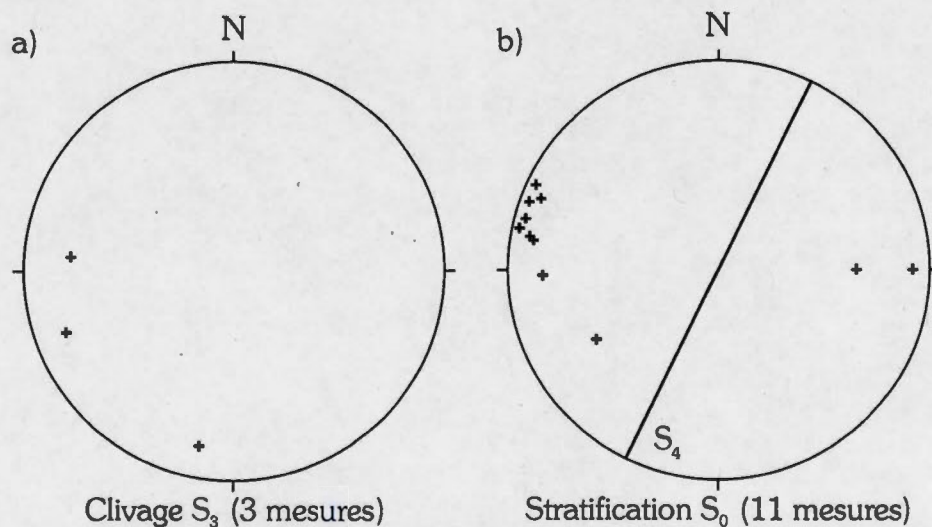


Figure 3.9 : Mesures structurales du domaine III; a) Pôles du clivage S_3 ; b) Pôles de la stratification.

CHAPITRE IV

MÉTALLOGÉNIE

Lors des cheminements sur le terrain, des sites d'intérêt métallogénique ont été visités dans le but d'étudier les minéralisations associées aux roches ophiolitiques et sédimentaires de la région. L'ensemble des gîtes et indices minéralisés de la région du lac Brompton sont localisés sur l'appendice A. Une brève interprétation des sites visités, basée sur les observations de terrain et de lames minces est présentée dans ce chapitre.

4.1 Gîtes et indices minéraux étudiés

Les minéralisations étudiées sont les gîtes de cuivre associés aux roches mafiques et ultramafiques de l'ophiolite (Brompton Copper et Brompton Copper Extension), ainsi que les indices associés aux roches sédimentaires supra-ophiolitiques appartenant au Mélange de Saint-Daniel (indice de cuivre Cobre et le conglomérat polygénique du gîte Brompton Copper).

4.2 Gîtes de cuivre associés aux roches mafiques et ultramafiques

4.2.1 Gîte Brompton Copper Extension

Ce gîte fut découvert en 1952 grâce à un affleurement minéralisé. Entre 1952 et 1974 divers travaux de cartographie géologique, géochimie, géophysique ainsi que 24 sondages sont effectués par diverses compagnies d'exploration (Low, 1952a, 1952b; Bergmann, 1956; Griffiths, Lacasse et Spertini, 1966; Vallée, 1977). Depuis, des travaux d'échantillonnage ont été entrepris (Gauthier, 1986b; Moreau, 1990). Ce gîte consiste en une minéralisation cuprifère sous forme de stockwerk (filonets de quelques millimètres) à quartz – pyrite –

chalcopryrite – pyrrhotite ou de sulfures disséminés. Une teneur maximale de 4,21% Cu a été obtenue par Gauthier (1986b). La minéralisation se trouve à la base de la séquence de roches volcaniques de l'ophiolite du Lac-Brompton, près du contact avec la péridotite. Un gabbro bréchique et les roches volcaniques hôtes de la minéralisation sont silicifiées et chloritisées. Suite aux observations de terrain, la teneur en Cu du gîte et la stratigraphie révisée de l'ophiolite, cette minéralisation est interprétée comme étant d'origine volcanogène hydrothermale.

4.2.2 Gîte Brompton Copper

Le gîte de cuivre Brompton Copper est situé à moins de 500 m au NE du gîte Brompton Copper Extension. Il a été découvert lors de travaux de géophysique car la minéralisation n'affleure pas en surface. Le gîte est divisé en une zone nord et une zone sud. Entre 1962 et 1977, 65 forages et des travaux de cartographie, géochimie et géophysique sont réalisés (Griffiths, Lacasse et Spertini, 1966; Husson, 1975; Thériault, 1976; Vallée, 1977). Des travaux d'échantillonnage et de géochimie sur les anciennes carottes de forage et les sites minéralisés ont été entrepris par la suite (Gauthier, 1986b; Moreau, 1990). Il est cependant difficile de travailler ce gîte car la minéralisation n'affleure pas et les carottes de forages ne sont plus disponibles. Le gîte se situe au contact entre une séquence de roches volcaniques ophiolitiques et une harzburgite serpentinisée à texture bréchique. D'après l'étude des résumés de forage, le gîte serait situé le long d'une faille mineure dont la nature n'a pu être déterminée à partir de la cartographie de surface, cette faille pourrait être associée à la formation de l'ophiolite en milieu océanique (faille normale syn-magmatique ?) ou à l'orogénie acadienne. Les roches volcaniques ont été affectées par un métamorphisme hydrothermal et montrent des assemblages métamorphiques typique du faciès des schistes verts, à chlorite – actinolite – albite – calcite – épidote. La serpentinite à texture bréchique est faiblement à fortement altérée en calcite – trémolite – chrysotile – lizardite ± ankérite. D'après les descriptions de forage, la minéralisation à pyrrhotite – chalcopryrite ± pyrite ± sphalérite est généralement associée à une silicification ou une altération en talc – carbonates de la roche hôte. Les teneurs en Cu atteignent 4,73% avec des teneurs élevées en Ag (11,0 g/t), Au (0,46 g/t), Zn (0,5 %) et Ni (0,05 %) (Griffiths, Lacasse et Spertini, 1966). Moreau

(1990) a signalé une valeur anormale de 2,1 g/t Au. Le gîte a récemment été évalué à 540 000 tonnes à 1,84% Cu (Vallée, 1987). La minéralisation est disséminée ou se présente sous forme d'amas ou de lentilles de sulfures massifs atteignant 6 m d'épaisseur dans la zone nord et 7,6 m dans la zone sud. Gauthier (1986a) a interprété ce gîte comme étant associé à l'imbrication des roches mafiques et ultramafiques de l'ophiolite dans le Mélange de Saint-Daniel, similairement au modèle de Buisson et Leblanc (1986) pour la formation des listwaenites. Dans le modèle de Gauthier (1986a), le Mélange de Saint-Daniel représente un complexe de subduction, dans lequel ont été incorporés les roches ophiolitiques lors de l'orogénèse taconienne.

Le gîte Brompton Copper possède des caractéristiques stratigraphiques semblables au gîte hydrothermal ophiolitique à Fe – Cu – (Ni – Co) Ivanovka dans la chaîne de l'Oural (Tessalina *et al.*, 2001), lequel est constitué de lentilles de sulfures massifs, en stockwerk ou disséminés à pyrrhotite – pyrite – chalcopyrite – cubanite avec plusieurs minéraux accessoires dont la chromite, cobaltite, sphalérite, Co-pyrite, Co-pentlandite, Ni-glaucodot, or natif, bismuth natif et pilsenite (Bi-tellure) (Tessalina *et al.*, 2001, 2003). Le gîte Ivanovka est situé à l'interface entre des péridotites mantelliques ou des gabbros et des roches volcaniques tholéitiques ou boninitiques (Tessalina *et al.*, 2003). La roche encaissante métasomatisée est constituée de talc – chlorite – carbonates – saponite (phyllosilicate) – quartz (Tessalina *et al.*, 2001; Nimis *et al.*, 2004). D'autres gîtes connus ont des caractéristiques communes avec celui de Brompton Copper (silicification et altération en talc – carbonates des serpentinites), tels que ceux de Eastern Metals (Appalaches du Québec; Auclair *et al.*, 1993), Sykesville (Appalaches du nord-est des États-Unis; Candela, Wyle et Burke, 1989), Outokumpu (Finlande; Peltola, 1978; Gaal et Parkikinen, 1993; Loukola-Ruskeeniemi, 1999). Par contre, ces derniers se trouvent à l'interface péridotites – sédiments et sont dépourvus de roches volcaniques dans leur assemblage lithologique. Le gîte Brompton Copper peut également être comparé à certains amas de sulfures massifs présentement en formation le long de la ride Médio-Atlantique. Les champs hydrothermaux à sulfures massifs ou à stockwerks des sites Rainbow, Logatchev, Menez Hom et Saldanha se forment sur des serpentinites exposées à l'eau de mer et sont enrichis en Cu, Zn, Ni, Co et Au (Fouquet, 1997; Murphy et Meyer, 1998; Fouquet, Charlou et Barriga, 2002). Sur la base du contenu métal du gîte Brompton Copper, du contexte révisé des roches encaissantes et de la

comparaison avec les sites hydrothermaux actifs, il est ici interprété comme étant d'âge Ordovicien et associé à la circulation hydrothermale dans les roches ophiolitiques en milieu océanique.

Un gîte de cuivre associé à des horizons siliceux dans la harzburgite a été intercepté en forage sous le Petit Lac Brompton (Bergmann et Bourgoin, 1972). Ce gîte n'a pu être visité et les carottes de forages ne sont plus disponibles. Il est probable que ces horizons siliceux soient issus de processus hydrothermaux semblables à ceux associés à la formation des gîtes Brompton Copper et Brompton Copper Extension.

4.3 Indices associés aux roches sédimentaires supra-ophiolitiques

4.3.1 Indice Cobre

L'indice de cuivre Cobre a été découvert à l'été 2002 grâce à un affleurement minéralisé (Vincent, 2004). Cet indice est situé dans la partie sud de la zone cartographiée et est encaissé dans des mudstones rouges et verts appartenant au Mélange de Saint-Daniel. La minéralisation est constituée de chalcocite finement disséminée ou sous forme de minces veinules (~0,2 mm). L'altération supergène a engendré la formation de malachite en surface et le long des fractures. La formation de chalcocite semble avoir été contrôlée par les conditions d'oxydo-réduction (fig. 4.1). Les roches mafiques – ultramafiques appartenant à l'ophiolite du Lac-Brompton et les sédiments de la base du Mélange de Saint-Daniel (mudstones colorés et conglomérats polygéniques) sont en partie constitués de minéraux labiles riches en cuivre (pyroxène et hornblende; Wedepohl, 1969) et représentent la source de Cu la plus probable. Cet indice minéralisé semble être une variante des gîtes de Cu de type stratiforme associés à des phénomènes diagénétiques de certaines séries sédimentaires transgressives (Brown, 1989, 1992; Kirkham, 1989; Walker, 1989). Il est donc interprété comme étant un cas particulier de minéralisation cuprifère, encaissé dans les roches sédimentaires de la base du Mélange de Saint-Daniel et associée aux conditions locales d'oxydo-réduction.

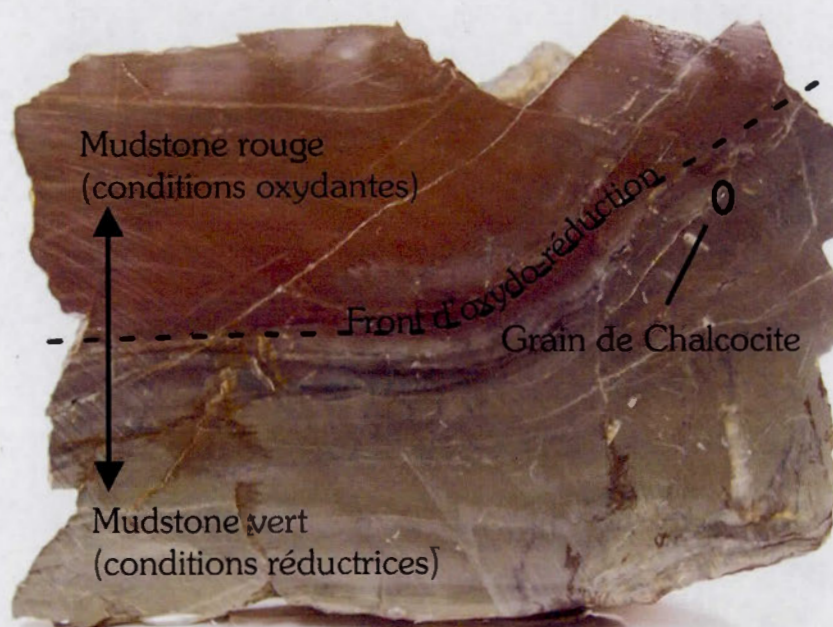


Figure 4.1 : Photo d'un échantillon pris à l'indice de cuivre Cobre. La minéralisation est localisée au contact entre des mudstones rouges et verts de la base du Mélange de Saint-Daniel.

4.3.2 Conglomérat polygénique du gîte Brompton Copper

Un conglomérat constitué de fragments de plagiogranite et de chert dans une matrice riche en chlorite, peut être observé reposant en discordance sur les basaltes coussinés au site du gîte Brompton Copper. Les fragments de chert sont constitués d'une matrice de quartz équi-granulaire à grain fin avec calcite – chromite – trémolite – chlorite et traces de pentlandite – millérite – skuttérudite – chalcopryrite – pyrite – sphalérite – galène – bornite et cobaltite. La présence de chromite disséminée indique un protolithe ultramafique qui a été silicifié (birbirite ; fig. 4.2). Des teneurs maximales de 320 ppm Cu, 308 ppm Ni, 16 ppm Zn, 39 ppm Co, 500 ppb Ag, 29 ppb Au et 0,22 % Cr ont été rapportés pour ces fragments (Gauthier, 1986b). Un conglomérat contenant des fragments minéralisés de birbirite a également été étudié par Gauthier (1986a, 1986b) au SO de la région à l'étude (indice Prospect Kennedy). Les fragments contiennent une minéralisation à pyrite nickélifère – gersdorffite et une altération tardive verdâtre en annabergite « nickel bloom ». Les fragments silicifiés s'apparentent aux roches quartzesuses et calco-silicatées des gisements hydrothermaux à Cu – Zn – Co d'Outokumpu en Finlande (Loukola-Ruskeeniemi, 1999) et aux birbirites du gîte de Ni – Cu – Zn Eastern Metals (Auclair *et al.*, 1993). Il a précédemment été présenté que plusieurs sites hydrothermaux actifs développés sur un substratum de serpentinite ont été découverts au cours des années 1990 le long de la Ride Médio-Atlantique. Certains de ces sites sont caractérisés par la formation de sulfures massifs enrichis en Cu, Zn, Ni et Co, parfois associés à une silicification de la roche hôte, tels que les champs hydrothermaux Saldanha et Menez Hom (Fouquet, Charlou et Barriga; 2002). Les fragments de roche ultramafique silicifiée, préservés dans le conglomérat polygénique du gîte Brompton Copper, sont donc considérés comme étant possiblement reliés à une minéralisation hydrothermale syn-océanique subséquentement remobilisée dans le Mélange de Saint-Daniel.

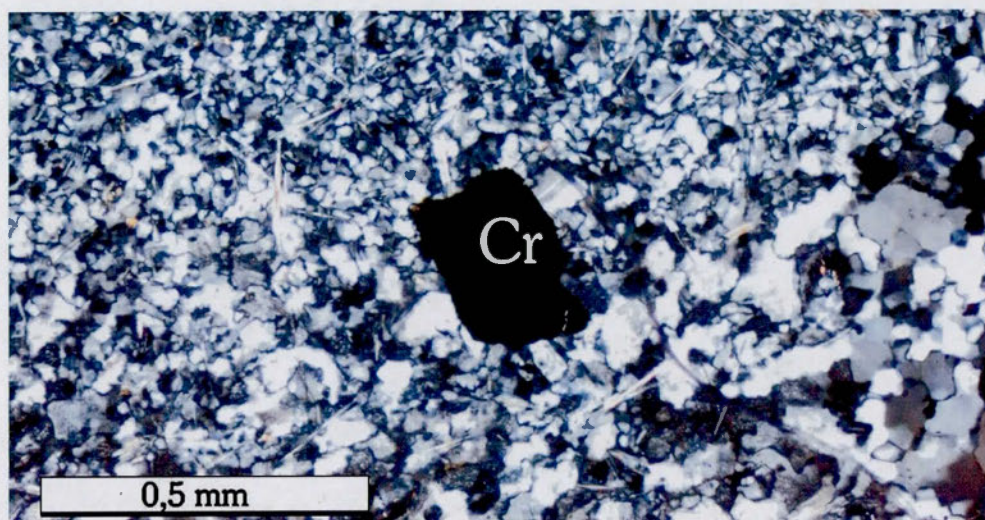


Figure 4.2 : Photographie prise au microscope, celle-ci montre un grain de chromite (Cr) dans une matrice microcristalline de quartz équi-granulaire. Des cristaux aciculaires de trémolite sont également visible dans la matrice. Cet échantillon provient d'un fragment de chert prélevé dans le conglomérat polygénique du gîte Brompton Copper.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les principaux objectifs de ce projet d'étude ont été d'évaluer si les roches mafiques – ultramafiques de la région du lac Brompton représentent les vestiges d'une ophiolite, d'en étudier l'évolution tectono-magmatique, d'établir la nature du contact supérieur de l'ophiolite avec le Mélange de Saint-Daniel et de vérifier, le cas échéant, la nature des similitudes stratigraphiques et géochimiques de l'ophiolite du Lac-Brompton avec les ophiolites d'Asbestos et Thetford-Mines et/ou du Mont-Orford. Certains gîtes et indices minéralisés de la région ont aussi été étudiés. Nos travaux de cartographie ont d'abord permis de construire une carte géologique détaillée de l'ophiolite du Lac-Brompton et de démontrer qu'elle représente effectivement un segment de lithosphère océanique constituée d'un assemblage manteau – croûte discontinue. Un assemblage, apparemment typique d'une dorsale océanique lente de type MAR, où les roches du manteau et/ou de la croûte inférieure sont exhumées précocement et forment localement le plancher océanique, sur lequel se déposent une série sédimentaire marine profonde. La nature du contact entre l'ophiolite du Lac-Brompton et le Mélange de Saint-Daniel sus-jacent a pu être clairement établi et représente une importante surface d'érosion, atteignant localement les roches du manteau et de la semelle tectonique sous-jacente. Les analyses géochimiques ont démontré que l'ophiolite du Lac-Brompton est d'affinité boninitique et possède des caractéristiques pétrologiques semblables à celles des ophiolites de Thetford-Mines et d'Asbestos, les trois ophiolites forment probablement une importante nappe ophiolitique composite. Enfin, un nouveau modèle géodynamique a été proposé et permet de mieux comprendre l'histoire stratigraphique et métallogénique de l'ophiolite du Lac-Brompton, de sa formation au sein d'un bassin océanique en contexte de supra-subduction, jusqu'aux orogénies taconienne et acadienne.

Certains éléments de la géologie régionale demeurent cependant à préciser. L'âge absolu du massif ophiolitique de la région du lac Brompton demeure indéterminé et il serait souhaitable d'acquérir de nouvelles données géochronologiques U/Pb et $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ sur les granitoïdes ainsi que sur la semelle tectonique. Ceci permettrait possiblement de contraindre la formation

et l'obduction des séries boninitiques ophiolitiques dans le sud du Québec. Il serait également important de vérifier les relations tectono-stratigraphiques entre les roches sédimentaires du Mélange de Saint-Daniel et les ophiolites d'Asbestos et du Mont-Orford. Il est fort probable que la discordance identifiée dans la région à l'étude se continue dans ces ophiolites. Des phénomènes d'accrétion océanique précoces (pré- à syn-obduction), antérieurs à la sédimentation du Saint-Daniel, pourraient éventuellement être mis en évidence, car, à priori, la même série sédimentaire recouvre chacune de ces ophiolites. Il est également suggéré de procéder à une révision systématique des autres ensembles litho-tectoniques du Mélange de Saint-Daniel, et qui ont précédemment été interprétés comme des unités tectoniques ou des écailles imbriquées dans le Saint-Daniel, par exemple, le Mélange ophiolitique de la Rivière des Plantes (Cousineau, 1991), les Volcanites de Ware (Cousineau, 1990), les basaltes et gabbros du Groupe de Bolton (Doolan *et al.*, 1982; Kim *et al.*, 2003; Lamothe, 1981; Mélançon *et al.*, 1997) ainsi que les Grès de la Colline Bunker (Blais, 1991; de Romer, 1980; Tremblay, 1990) et les roches volcaniques associées (voir Tremblay, Malo et St-Julien, 1995).

La section suivante présente un résumé des principales conclusions de ce mémoire

- 1) Les roches mafiques et ultramafiques de la région du lac Brompton forment une séquence ophiolitique : l'ophiolite du Lac-Brompton. Elle est caractérisée par une section crustale boninitique amincie constituée d'intrusions de pyroxénites, gabbros, granitoïdes et d'une mince bande de roches volcaniques formée dans un bassin de supra-subduction.
- 2) Les péridotites mantelliques de l'ophiolite du Lac-Brompton ont été exhumées de façon précoce et forment les vestiges d'un « core complex » océanique.
- 3) Le Mélange de Saint-Daniel repose en discordance sur les roches ophiolitiques. La surface d'érosion située à la base du Saint-Daniel atteint localement les péridotites du manteau et les roches métamorphiques de la semelle tectonique sous-jacente.
- 4) Les ophiolites du Lac-Brompton, d'Asbestos et de Thetford-Mines forment une importante lame ophiolitique composite représentant un segment de lithosphère océanique de type boninitique, dont l'âge le plus probable est ca. 480 Ma.

- 5) Les roches de l'ophiolite du Lac-Brompton et du Mélange de Saint-Daniel ont subi une histoire structurale polyphasée. Elle s'initie en milieu océanique, probablement par le jeu de failles normales, s'est poursuivie avec la mise en place de l'ophiolite sur la marge laurentienne et la superposition de deux phases de déformation régionale.

ANNEXE A

RÉSULTATS DES ANALYSES GÉOCHIMIQUES

	04-1338	05- 1023	04-1207-B	05- 1032	04-1134-2	04-1134-A
	1	2	3	4	5	6
	basalte	basalte	boninite	boninite	boninite	boninite
%	Orford	Orford	Lac-Brompton	Lac-Brompton	Lac-Brompton	Lac-Brompton
SiO ₂	54,57	53,73	56,29	46,45	50,16	59,65
TiO ₂	1,85	2,12	0,11	0,18	0,16	0,12
Al ₂ O ₃	14,82	15,89	12,55	11,11	12,67	9,25
Fe ₂ O ₃ t	12,35	12,21	4,80	13,11	10,75	6,98
MgO	3,14	3,29	6,08	15,55	11,40	7,08
CaO	3,28	2,94	7,77	7,02	5,75	7,55
Na ₂ O	8,24	7,46	6,46	0,22	4,10	4,21
K ₂ O	0,08	0,07	0,67	1,85	0,11	0,06
MnO	0,09	0,28	0,09	0,24	0,19	0,10
P ₂ O ₅	0,25	0,36	<0,035	<0,035	< 0.035	< 0.035
ppm						
Rb	0,97	0,58	10,79	42,06	1,89	0,56
Ba	69,4	68,8	103,1	50,8	34,0	14,0
Pb	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Sr	85,5	96,8	156,0	12,5	39,6	49,5
Th	1,04	2,10	0,49	0,14	0,28	0,09
U	0,22	0,44	0,14	0,05	0,08	0,04
Nb	15,49	31,44	1,34	0,33	0,47	0,33
Ta	1,05	1,98	0,11	<0,03	0,02	0,03
Zr	136,84	158,94	9,52	4,98	5,48	3,99
Hf	3,40	4,27	0,26	0,19	0,15	0,08
Y	37,98	40,34	3,20	4,20	5,42	2,83
La	8,760	17,511	1,136	0,348	0,199	0,141
Ce	21,834	39,199	2,856	1,191	0,257	<0,02
Pr	3,406	4,791	0,304	0,128	0,126	0,067
Nd	16,183	21,888	1,156	0,725	0,457	0,184
Sm	4,888	5,189	0,220	0,313	0,169	0,062
Eu	1,477	1,892	0,062	0,089	<0,007	<0,007
Gd	6,186	6,677	0,242	0,387	0,535	0,179
Tb	0,934	1,144	0,056	0,124	0,078	0,035
Dy	6,759	6,653	0,424	0,693	0,779	0,398
Ho	1,478	1,342	0,108	0,153	0,233	0,073
Er	4,292	4,190	0,328	0,625	0,662	0,279
Tm	0,591	0,587	0,052	0,082	0,118	0,030
Yb	3,895	3,545	0,552	0,644	0,762	0,393
Lu	0,498	0,523	0,083	0,099	0,120	0,046
Cr	228	231	755	579	1006	915
Ni	91	104	203	120	231	178
Co	54	32	32	51	51	43
Cu	506	158	736	294	1033	129
Zn	75	77	47	107	77	48
V	304	301	152	277	204	149
Sc	39	34	33	53	46	37
total	99,90	100,35	99,70	100,01	99,81	99,34

8 : réfère au point d'échantillonnage sur la carte en pochette

< ld = sous la limite de détection

	04-1166	04-1328-B	05- 1289	04-1333	04-1014	04-1063
	7	8	9	10	11	12
	boninite	diorite	diorite	gabbro	gabbro	clinopyroxénite
%	Lac-Brompton	Lac-Brompton	Lac-Brompton	Lac-Brompton	Lac-Brompton	Lac-Brompton
SiO ₂	51,80	59,79	50,64	47,80	46,55	50,12
TiO ₂	0,12	0,20	0,17	0,18	0,10	0,08
Al ₂ O ₃	9,44	13,74	18,51	17,50	16,34	4,33
Fe ₂ O ₃ t	9,53	4,99	9,87	4,47	5,78	10,09
MgO	13,23	6,84	6,57	10,85	10,08	17,91
CaO	8,59	4,61	6,42	11,06	15,39	13,44
Na ₂ O	2,68	6,77	3,42	3,10	2,02	0,31
K ₂ O	0,37	0,72	1,93	0,68	0,25	0,24
MnO	0,17	0,05	0,15	0,10	0,12	0,19
P ₂ O ₅	< 0,035	< 0,035	<0,035	<0,034	< 0,035	<0,034
ppm						
Rb	7,79	8,11	34,57	9,44	3,91	2,24
Ba	126,1	229,7	272,7	122,7	35,4	128,5
Pb	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Sr	176,9	245,8	171,6	175,1	329,5	68,6
Th	0,26	1,24	0,24	<0,07	<0,07	0,28
U	0,15	0,42	0,14	<0,03	<0,03	0,13
Nb	0,73	3,51	1,26	0,35	0,06	1,09
Ta	0,06	0,28	0,06	0,03	0,01	0,09
Zr	6,02	21,83	10,71	5,97	0,55	10,47
Hf	0,19	0,84	0,31	0,21	<0,02	0,30
Y	4,25	5,87	3,28	6,85	1,83	3,70
La	1,060	3,817	1,689	0,505	< 0,02	1,238
Ce	1,970	11,581	3,568	1,614	< 0,02	2,478
Pr	0,246	1,207	0,371	0,229	0,009	0,369
Nd	0,927	4,829	1,789	1,328	< 0,02	1,708
Sm	0,092	1,075	0,295	0,537	< 0,02	0,438
Eu	0,052	0,208	0,213	0,560	0,037	0,070
Gd	0,350	1,121	0,457	0,936	0,092	0,560
Tb	0,051	0,172	0,094	0,162	0,024	0,079
Dy	0,462	1,148	0,479	1,131	0,235	0,576
Ho	0,120	0,273	0,095	0,248	0,055	0,119
Er	0,410	0,675	0,369	0,676	0,183	0,429
Tm	0,064	0,115	0,049	0,100	0,014	0,071
Yb	0,568	0,825	0,361	0,669	0,164	0,508
Lu	0,086	0,118	0,064	0,091	0,021	0,081
Cr	795	134	37	1499	373	629
Ni	198	87	40	230	67	296
Co	49	25	30	38	43	63
Cu	321	192	57	856	137	189
Zn	69	25	66	48	43	64
V	171	239	373	128	215	212
Sc	35	48	47	33	60	91
total	99,17	99,18	100,40	99,62	100,44	99,24

8 : réfère au point d'échantillonnage sur la carte en pochette

< ld = sous la limite de détection

	05- 1061-2	05- 1041	04-1032	05- 1064	05- 1109	04-1251
	13	14	15	16	17	18
	clinopyroxénite	plagiogranite	plagiogranite	plagiogranite	plagiogranite	plagiogranite
	Lac-Brompton	Lac-Brompton	Lac-Brompton	Lac-Brompton	Lac-Brompton	Lac-Brompton
%						
SiO ₂	49,90	66,77	59,00	61,26	67,13	68,64
TiO ₂	0,09	0,23	0,23	0,15	0,16	0,18
Al ₂ O ₃	2,54	15,95	16,26	13,83	15,14	13,69
Fe ₂ O ₃ t	8,90	4,66	7,90	6,43	4,91	3,76
MgO	20,37	2,98	4,12	6,77	2,24	1,79
CaO	15,40	0,93	4,27	3,59	2,69	0,52
Na ₂ O	0,22	5,68	2,81	3,11	5,37	6,41
K ₂ O	0,04	1,36	2,55	2,73	1,25	0,41
MnO	0,21	0,08	0,12	0,10	0,09	0,04
P ₂ O ₅	<0,034	0,05	0,04	<0,034	<0,034	0,05
ppm						
Rb	0,60	40,25	44,03	65,90	30,35	11,13
Ba	3,8	270,4	443,6	446,2	741,7	312,5
Pb	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Sr	9,1	158,8	143,5	98,1	186,6	219,0
Th	0,10	2,42	1,29	1,60	1,71	2,78
U	0,06	0,58	0,66	0,76	0,66	1,23
Nb	0,55	6,30	4,17	4,33	6,58	7,53
Ta	0,03	0,46	0,31	0,38	0,47	1,41
Zr	6,54	44,51	48,82	45,04	55,28	66,87
Hf	0,24	1,10	1,40	1,19	1,49	1,67
Y	3,16	10,81	6,17	4,78	8,01	6,78
La	0,782	5,863	4,446	5,628	6,350	9,075
Ce	2,656	12,607	10,185	14,147	13,785	18,667
Pr	0,262	1,511	1,149	1,034	1,557	1,865
Nd	1,229	6,149	4,618	4,031	6,116	6,741
Sm	0,489	1,251	0,937	0,718	1,323	1,211
Eu	0,046	0,300	0,211	0,213	0,233	0,201
Gd	0,394	1,394	0,853	0,862	1,160	1,235
Tb	0,069	0,269	0,162	0,114	0,175	0,157
Dy	0,514	1,701	1,008	0,797	1,169	1,021
Ho	0,097	0,345	0,205	0,172	0,231	0,209
Er	0,332	1,037	0,620	0,482	0,854	0,708
Tm	0,058	0,183	0,103	0,071	0,126	0,096
Yb	0,291	1,028	0,790	0,547	0,747	0,843
Lu	0,043	0,153	0,151	0,079	0,141	0,110
Cr	541	113	98	137	106	145
Ni	325	104	42	76	<34	<35
Co	52	19	31	21	<14	51
Cu	41	98	63	36	30	265
Zn	62	29	73	138	45	37
V	271	134	232	171	126	99
Sc	112	27	37	35	22	20
total	100,32	100,65	99,89	100,13	100,33	97,32

8 : réfère au point d'échantillonnage sur la carte en pochette

< Id = sous la limite de détection

	04-1267	05- 1004	05- 1012	04-1287	05- 1061
	19	20	21	22	23
	granite	granite	granite	harzburgite	harzburgite
%	Lac-Brompton	Lac-Brompton	Lac-Brompton	Lac-Brompton	Lac-Brompton
SiO ₂	71,74	71,46	72,13	37,79	41,72
TiO ₂	0,22	0,49	0,56	0,01	0,01
Al ₂ O ₃	13,27	14,20	13,66	0,84	1,00
Fe ₂ O ₃ t	1,46	3,00	3,50	7,94	7,51
MgO	1,64	1,58	1,04	37,34	37,62
CaO	0,35	0,81	0,72	0,03	0,03
Na ₂ O	3,65	2,82	2,22	<0,0035	<0,003
K ₂ O	5,96	4,43	4,93	0,01	0,02
MnO	0,04	0,09	0,06	0,12	0,12
P ₂ O ₅	0,18	0,17	0,14	< 0.035	<0,03
ppm					
Rb	147,03	133,23	138,81	0,52	0,87
Ba	732,9	689,1	940,6	11,0	7,4
Pb	<100	<100	<100	<100	79,63
Sr	109,4	132,6	183,5	<1,4	3,4
Th	5,03	9,33	9,89	<0,07	0,05
U	1,94	1,41	1,41	<0,03	0,03
Nb	15,07	15,04	15,15	0,06	0,07
Ta	1,97	1,05	0,95	0,02	<0,02
Zr	88,79	176,92	220,80	0,30	0,46
Hf	2,49	4,43	5,74	<0,02	0,06
Y	20,94	27,44	25,49	0,43	0,19
La	15,415	33,705	33,971	<0,02	0,602
Ce	33,797	75,899	76,560	<0,02	3,123
Pr	4,077	8,482	8,760	<0,004	0,052
Nd	15,891	32,971	33,544	<0,02	0,111
Sm	3,357	6,132	5,519	<0,02	< 0.2
Eu	0,466	1,245	1,302	<0,007	0,026
Gd	3,018	4,783	4,990	<0,04	0,132
Tb	0,504	0,769	0,761	<0,07	0,016
Dy	3,213	4,997	4,419	<0,04	< 0.05
Ho	0,706	0,957	0,875	<0,007	0,020
Er	2,421	2,820	2,554	<0,02	0,054
Tm	0,345	0,441	0,439	<0,004	< 0.007
Yb	2,261	2,539	2,516	<0,02	< 0.02
Lu	0,300	0,419	0,390	0,004	< 0.02
Cr	146	161	209	2692	2855
Ni	<35	61	50	2037	2151
Co	33	<14	<14	99	95
Cu	181	156	104	189	259
Zn	20	39	60	54	65
V	20	37	45	53	29
Sc	6	9	8	10	7
total	99,67	100,74	100,50	97,50	100,77

8 : réfère au point d'échantillonnage sur la carte en pochette

< ld = sous la limite de détection

ANNEXE B

RÉSULTATS DES ANALYSES À LA MICROSONDE

Échantillon : 04-1091-b (harzburgite)

24 (localisation sur carte, appendice A)

	<u>spinelle c1</u>	<u>spinelle c2</u>	<u>spinelle c3</u>	<u>spinelle c4</u>	<u>spinelle c5</u>	<u>spinelle c6</u>
%						
SiO ₂	-	-	-	-	-	-
TiO ₂	<0,15	<0,15	<0,14	<0,15	<0,14	<0,14
Al ₂ O ₃	26,26	25,70	27,08	27,17	27,27	27,45
Cr ₂ O ₃	41,71	42,53	41,49	40,89	40,94	40,93
FeO	16,41	16,59	15,63	16,50	16,55	16,12
MnO	0,28	0,30	0,23	0,20	0,24	0,27
MgO	14,48	14,27	15,01	14,58	14,39	14,79
CaO	-	-	-	-	-	-
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-
Total	99,15	99,44	99,47	99,37	99,43	99,63
cations						
Si	-	-	-	-	-	-
Ti	-	-	-	-	-	-
Al IV	-	-	-	-	-	-
Al VI	-	-	-	-	-	-
Al	7,4662	7,3166	7,6311	7,6797	7,7099	7,7245
Cr	7,9560	8,1232	7,8425	7,7535	7,7656	7,7250
Fe(iii)	0,5778	0,5391	0,5167	0,5556	0,5071	0,5243
Fe(ii)	2,7330	2,8126	2,6081	2,7532	2,8131	2,6942
Mn	0,0574	0,0604	0,0474	0,0402	0,0488	0,0542
Mg	5,2096	5,1376	5,3494	5,2121	5,1468	5,2647
Ca	-	-	-	-	-	-
Na	-	-	-	-	-	-
K	-	-	-	-	-	-
Total	24,00	23,99	24,00	23,99	23,99	23,99
Wo	-	-	-	-	-	-
En	-	-	-	-	-	-
Fs	-	-	-	-	-	-
Fe#	34,41	35,38	32,78	34,57	35,34	33,85
Cr#	51,59	52,61	50,68	50,24	50,18	50,00
Mg#	65,59	64,62	67,22	65,43	64,66	66,15

Échantillon : 04-1061-1 (harzburgite)

23 (localisation sur carte, appendice A)

	<u>spinelle c1</u>	<u>spinelle c2</u>	<u>spinelle c3</u>	<u>spinelle c4</u>
%				
SiO ₂	-	-	-	-
TiO ₂	0,19	0,30	0,27	0,21
Al ₂ O ₃	0,42	0,79	0,54	0,56
Cr ₂ O ₃	50,16	52,30	52,13	52,62
FeO	38,94	41,34	41,35	41,30
MnO	2,06	2,12	2,15	2,14
MgO	1,84	0,36	0,38	0,35
CaO	-	-	-	-
Na ₂ O	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-
Total	93,61	97,22	96,80	97,17
cations				
Si	-	-	-	-
Ti	0,0439	0,0673	0,0615	0,0467
Al IV	-	-	-	-
Al VI	-	-	-	-
Al	0,1547	0,2821	0,1919	0,1994
Cr	12,3043	12,4963	12,5198	12,5922
Fe(iii)	3,4533	3,0870	3,1654	3,1150
Fe(ii)	6,6501	7,3610	7,3381	7,3390
Mn	0,5421	0,5436	0,5522	0,5484
Mg	0,8516	0,1626	0,1712	0,1593
Ca	-	-	-	-
Na	-	-	-	-
K	-	-	-	-
Total	24,00	24,00	24,00	24,00
Wo	-	-	-	-
En	-	-	-	-
Fs	-	-	-	-
Fe#	88,65	97,84	97,72	97,88
Cr#	98,76	97,79	98,49	98,44
Mg#	65,59	64,62	67,22	65,43

Échantillon : 04-1287 (harzburgite)

22 (localisation sur carte, appendice A)

	<u>spinelle c1</u>	<u>spinelle c2</u>	<u>spinelle c3</u>	<u>spinelle c4</u>	<u>spinelle c5</u>	<u>spinelle c6</u>
%						
SiO ₂	-	-	-	-	-	-
TiO ₂	<0,17	<0,15	<0,14	<0,15	<0,14	<0,15
Al ₂ O ₃	0,04	30,79	31,01	31,36	32,12	30,91
Cr ₂ O ₃	2,73	36,68	36,06	35,42	34,79	36,77
FeO	91,01	16,86	17,39	17,40	17,43	16,85
MnO	0,17	0,23	0,29	0,21	0,24	0,19
MgO	0,19	15,73	16,07	15,84	16,07	16,39
CaO	-	-	-	-	-	-
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-
Total	94,16	100,29	100,85	100,27	100,71	101,16
cations						
Si	-	-	-	-	-	-
Ti	-	-	-	-	-	-
Al IV	-	-	-	-	-	-
Al VI	-	-	-	-	-	-
Al	0,0129	8,4520	8,4481	8,5850	8,7243	8,3896
Cr	0,6581	6,7544	6,5911	6,5034	6,3390	6,6945
Fe(iii)	15,3180	0,7929	0,9490	0,8945	0,9187	0,8990
Fe(ii)	7,8763	2,4913	2,4129	2,4845	2,4405	2,3455
Mn	0,0447	0,0458	0,0562	0,0403	0,0474	0,0371
Mg	0,0845	5,4633	5,5368	5,4838	5,5211	5,6259
Ca	-	-	-	-	-	-
Na	-	-	-	-	-	-
K	-	-	-	-	-	-
Total	23,99	24,00	23,99	23,99	23,99	23,99
Wo	-	-	-	-	-	-
En	-	-	-	-	-	-
Fs	-	-	-	-	-	-
Fe#	98,94	31,32	30,35	31,18	30,65	29,42
Cr#	98,07	44,42	43,83	43,10	42,08	44,38
Mg#	1,06	68,68	69,65	68,82	69,35	70,58

Échantillon : 04-1207-b (boninite)

3 (localisation sur carte, appendice A)

	<u>spinelle c1</u>	<u>spinelle c2</u>	<u>spinelle c3</u>	<u>spinelle c4</u>	<u>spinelle c4</u>	<u>spinelle c5</u>
%						
SiO ₂	-	-	-	-	-	-
TiO ₂	<0,16	<0,15	<0,16	<0,15	<0,16	<0,16
Al ₂ O ₃	9,74	9,44	9,77	9,22	9,25	9,73
Cr ₂ O ₃	56,81	57,51	55,84	57,62	56,53	56,12
FeO	20,28	18,89	19,86	19,34	20,04	21,26
MnO	0,30	0,27	0,33	0,33	0,27	0,38
MgO	11,91	12,86	12,73	12,75	12,37	11,61
CaO	-	-	-	-	-	-
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-
Total	99,17	99,09	98,59	99,41	98,59	99,18
cations						
Si	-	-	-	-	-	-
Ti	-	-	-	-	-	-
Al IV	-	-	-	-	-	-
Al VI	-	-	-	-	-	-
Al	3,0107	2,9049	3,0180	2,8350	2,8713	3,0138
Cr	11,7868	11,8770	11,5704	11,8845	11,7723	11,6620
Fe(iii)	1,1536	1,1686	1,3860	1,2204	1,3053	1,2894
Fe(ii)	3,2967	2,9568	2,9655	2,9990	3,1085	3,3837
Mn	0,0671	0,0602	0,0730	0,0736	0,0596	0,0837
Mg	4,6606	5,0078	4,9743	4,9574	4,8574	4,5500
Ca	-	-	-	-	-	-
Na	-	-	-	-	-	-
K	-	-	-	-	-	-
Total	23,98	23,98	23,99	23,97	23,97	23,98
Wo	-	-	-	-	-	-
En	-	-	-	-	-	-
Fs	-	-	-	-	-	-
Fe#	98,94	31,32	30,35	31,18	30,65	29,42
Cr#	98,07	44,42	43,83	43,10	42,08	44,38
Mg#	1,06	68,68	69,65	68,82	69,35	70,58

	<u>amphibole c1</u>	<u>amphibole c2</u>	<u>amphibole c4</u>
%			
SiO ₂	55,96	55,30	56,17
TiO ₂	<0,13	<0,14	<0,13
Al ₂ O ₃	0,92	1,49	0,88
Cr ₂ O ₃	0,20	<0,06	0,12
FeO	9,22	9,78	9,42
MnO	0,24	0,22	0,27
MgO	18,38	17,62	18,19
CaO	13,01	13,00	13,10
Na ₂ O	0,14	0,18	0,10
K ₂ O	0,03	0,05	0,04
Total	98,11	97,66	98,29
cations			
Si	7,8846	7,8502	7,9057
Ti	-	-	-
Al IV	0,1154	0,1498	0,0943
Al VI	0,0381	0,0996	0,0510
Al	0,1534	0,2494	0,1453
Cr	0,0221	-	0,0130
Fe(iii)	0,0087	-	-
Fe(ii)	1,0776	1,1613	1,1083
Mn	0,0283	0,0258	0,0318
Mg	3,8600	3,7288	3,8174
Ca	1,9642	1,9765	1,9759
Na	0,0385	0,0493	0,0273
K	0,0058	0,0085	0,0079
Total	15,04	15,05	15,03
Wo	-	-	-
En	-	-	-
Fs	-	-	-
	actinolite	actinolite	actinolite
Fe#	-	-	-
Cr#	-	-	-
Mg#	78,18	76,25	77,50

Échantillon : 04-1166 (boninite)

7 (localisation sur carte, appendice A)

	<u>amphibole c4</u>	<u>spinelle c1</u>	<u>spinelle c2</u>	<u>spinelle c3</u>	<u>spinelle c4</u>	<u>spinelle c5</u>
%						
SiO ₂	56,23	-	-	-	-	-
TiO ₂	<0,13	0,16	<0,16	<0,15	<0,15	<0,16
Al ₂ O ₃	0,67	8,30	7,93	7,06	8,35	8,37
Cr ₂ O ₃	<0,06	56,98	58,73	60,28	57,91	56,57
FeO	9,37	22,14	20,65	19,92	21,11	21,94
MnO	0,20	0,26	0,29	0,34	0,31	0,33
MgO	18,28	11,15	11,73	11,48	11,38	10,92
CaO	13,25	-	-	-	-	-
Na ₂ O	0,10	-	-	-	-	-
K ₂ O	0,03	-	-	-	-	-
Total	98,15	98,99	99,43	99,21	99,18	98,24
cations						
Si	7,9207	-	-	-	-	-
Ti	-	0,0312	-	-	-	-
Al IV	0,0793	-	-	-	-	-
Al VI	0,0310	-	-	-	-	-
Al	0,1104	2,5999	2,4690	2,2138	2,6082	2,6437
Cr	-	11,9710	12,2653	12,6893	12,1291	11,9838
Fe(iii)	0,0125	1,3667	1,2236	1,0448	1,2205	1,3297
Fe(ii)	1,0911	3,5542	3,3373	3,3902	3,4561	3,5870
Mn	0,0242	0,0576	0,0640	0,0776	0,0698	0,0742
Mg	3,8387	4,4193	4,6198	4,5583	4,4953	4,3602
Ca	1,9998	-	-	-	-	-
Na	0,0276	-	-	-	-	-
K	0,0056	-	-	-	-	-
Total	15,03	24,00	23,98	23,97	23,98	23,98
Wo	-	-	-	-	-	-
En	-	-	-	-	-	-
Fs	-	-	-	-	-	-
actinolite						
Fe#	-	44,58	41,94	42,65	43,47	45,14
Cr#	-	82,16	83,24	85,15	82,30	81,93
Mg#	77,87	55,42	58,06	57,35	56,53	54,86

	<u>amphibole c2</u>	<u>amphibole c4</u>	<u>amphibole c7</u>	<u>pyroxène c2</u>	<u>pyroxène c4</u>	<u>pyroxène c7</u>
%						
SiO ₂	56,21	55,04	56,12	53,16	53,07	53,89
TiO ₂	<0,12	<0,12	<0,13	<0,13	<0,13	<0,12
Al ₂ O ₃	0,51	2,16	0,53	1,11	0,64	0,47
Cr ₂ O ₃	0,14	<0,06	0,12	0,07	0,06	<0,07
FeO	9,51	9,03	9,82	7,92	7,46	7,41
MnO	0,12	0,14	0,09	0,23	0,25	0,25
MgO	18,41	18,35	17,89	13,58	13,76	14,05
CaO	13,10	13,07	13,09	23,32	22,99	23,82
Na ₂ O	0,07	0,22	0,13	0,36	0,37	0,25
K ₂ O	0,03	0,07	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Total	98,13	98,08	97,81	99,83	98,61	100,24
cations						
Si	7,9189	7,7441	7,9453	1,9828	1,9988	1,9977
Ti	-	-	-	-	-	-
Al IV	0,0811	0,2559	0,0547	0,0172	0,0012	0,0023
Al VI	0,0029	0,1019	0,0336	0,0315	0,0273	0,0182
Al	0,0840	0,3578	0,0883	0,0487	0,0285	0,0205
Cr	0,0150	-	0,0139	0,0020	0,0019	-
Fe(iii)	0,0298	0,0788	-	0,0102	-	-
Fe(ii)	1,0904	0,9832	1,1622	0,2365	0,2349	0,2297
Mn	0,0138	0,0172	0,0112	0,0071	0,0080	0,0078
Mg	3,8673	3,8481	3,7761	0,7550	0,7724	0,7766
Ca	1,9767	1,9699	1,9858	0,9320	0,9277	0,9458
Na	0,0197	0,0606	0,0349	0,0263	0,0273	0,0181
K	0,0058	0,0129	-	-	-	-
Total	15,02	15,07	15,02	4,00	4,00	4,00
Wo	-	-	-	47,38	47,08	47,81
En	-	-	-	38,38	39,20	39,26
Fs	-	-	-	12,90	12,33	12,01
	actinolite	actinolite	actinolite	diopside	diopside	diopside
Fe#	-	-	-	-	-	-
Cr#	-	-	-	-	-	-
Mg#	78,01	79,65	76,47	76,15	76,68	77,18

	<u>pyroxène c7</u>	<u>pyroxène c7</u>	<u>pyroxène</u>
%			
SiO ₂	53,38	53,02	52,97
TiO ₂	<0,13	<0,13	<0,13
Al ₂ O ₃	0,72	1,27	1,19
Cr ₂ O ₃	0,09	0,07	0,11
FeO	8,65	7,89	7,47
MnO	0,38	0,33	0,20
MgO	13,23	13,50	13,89
CaO	23,88	23,56	23,62
Na ₂ O	0,27	0,26	0,27
K ₂ O	<0,03	<0,03	<0,03
Total	100,65	99,96	99,74
cations			
Si	1,9854	1,9767	1,9756
Ti	-	-	-
Al IV	0,0146	0,0233	0,0244
Al VI	0,0169	0,0326	0,0280
Al	0,0315	0,0559	0,0524
Cr	0,0027	0,0022	0,0033
Fe(iii)	0,0214	0,0094	0,0197
Fe(ii)	0,2472	0,2363	0,2129
Mn	0,0121	0,0105	0,0064
Mg	0,7336	0,7504	0,7721
Ca	0,9517	0,9410	0,9439
Na	0,0195	0,0186	0,0193
K	-	-	-
Total	4,01	4,00	4,01
Wo	47,93	47,86	47,81
En	36,95	38,16	39,10
Fs	14,13	13,03	12,11
	<u>diopside</u>	<u>diopside</u>	<u>diopside</u>
Fe#	-	-	-
Cr#	-	-	-
Mg#	74,80	76,05	78,39

Échantillon : 04-1311 (gabbro)

25 (localisation sur carte, appendice A)

	<u>amphibole c1</u>	<u>amphibole c2</u>	<u>amphibole c3</u>	<u>amphibole c3</u>	<u>amphibole c5</u>	<u>amphibole c6</u>
%						
SiO ₂	52,51	51,98	49,16	50,06	52,05	52,13
TiO ₂	<0,12	0,13	0,70	0,66	0,21	0,13
Al ₂ O ₃	4,16	4,49	6,12	5,87	4,43	4,32
Cr ₂ O ₃	<0,06	<0,06	<0,07	<0,06	<0,07	<0,07
FeO	10,95	10,61	11,77	11,05	10,56	10,60
MnO	0,18	0,17	0,15	0,17	0,19	0,19
MgO	17,76	17,61	16,37	17,24	18,04	17,75
CaO	11,56	11,45	11,45	11,39	11,42	11,29
Na ₂ O	0,43	0,65	1,26	0,97	0,59	0,53
K ₂ O	0,07	0,06	0,11	0,09	0,05	0,06
Total	97,69	97,15	97,16	97,54	97,56	97,01
cations						
Si	7,4558	7,4318	7,1182	7,1652	7,3959	7,4542
Ti	-	0,0134	0,0766	0,0705	0,0221	0,0141
Al IV	0,5442	0,5682	0,8818	0,8348	0,6041	0,5458
Al VI	0,1511	0,1889	0,1628	0,1561	0,1371	0,1813
Al	0,6953	0,7571	1,0447	0,9909	0,7412	0,7271
Cr	-	-	-	-	-	-
Fe(iii)	0,2481	0,1620	0,1838	0,2453	0,2470	0,1774
Fe(ii)	1,0525	1,1066	1,2408	1,0770	1,0078	1,0901
Mn	0,0220	0,0207	0,0183	0,0206	0,0225	0,0225
Mg	3,7597	3,7541	3,5332	3,6786	3,8211	3,7837
Ca	1,7580	1,7542	1,7760	1,7461	1,7384	1,7300
Na	0,1170	0,1802	0,3540	0,2700	0,1620	0,1464
K	0,0121	0,0102	0,0196	0,0164	0,0098	0,0117
Total	15,12	15,19	15,37	15,28	15,17	15,16
Wo	-	-	-	-	-	-
En	-	-	-	-	-	-
Fs	-	-	-	-	-	-
	magnésio-	magnésio-	magnésio-	magnésio-	magnésio-	magnésio-
	hornblende	hornblende	hornblende	hornblende	hornblende	hornblende
Fe#	-	-	-	-	-	-
Cr#	-	-	-	-	-	-
Mg#	78,13	77,23	74,01	77,35	79,13	77,63

	<u>pyroxène c1</u>	<u>pyroxène c2</u>	<u>pyroxène c3</u>
%			
SiO ₂	52,71	53,22	52,79
TiO ₂	<0,12	<0,13	<0,13
Al ₂ O ₃	1,25	0,68	0,91
Cr ₂ O ₃	0,10	<0,06	<0,06
FeO	7,97	7,70	7,00
MnO	0,20	0,24	0,23
MgO	15,06	14,89	14,91
CaO	22,65	23,21	23,89
Na ₂ O	0,19	0,22	0,20
K ₂ O	<0,03	<0,03	<0,03
Total	100,25	100,28	99,98
cations			
Si	1,9565	1,9745	1,9635
Ti	-	-	-
Al IV	0,0435	0,0255	0,0365
Al VI	0,0111	0,0041	0,0034
Al	0,0546	0,0296	0,0399
Cr	0,0029	-	-
Fe(iii)	0,0560	0,0477	0,0675
Fe(ii)	0,1903	0,1904	0,1491
Mn	0,0062	0,0076	0,0072
Mg	0,8332	0,8233	0,8265
Ca	0,9008	0,9225	0,9520
Na	0,0138	0,0160	0,0143
K	-	-	-
Total	4,01	4,01	4,02
Wo	45,03	45,96	47,21
En	41,65	41,01	40,99
Fs	12,63	12,24	11,09
	<u>diopside</u>	<u>diopside</u>	<u>diopside</u>
Fe#	-	-	-
Cr#	-	-	-
Mg#	81,41	81,22	84,72

Échantillon : 04-1289 (diorite)

9 (localisation sur carte, appendice A)

	<u>amphibole c2</u>	<u>amphibole c3</u>	<u>amphibole c3</u>	<u>amphibole c1</u>	<u>amphibole c1</u>
%					
SiO ₂	48,15	48,77	54,71	49,29	54,82
TiO ₂	0,59	0,41	<0,13	0,24	<0,13
Al ₂ O ₃	6,27	5,84	1,20	5,42	1,03
Cr ₂ O ₃	<0,07	<0,07	<0,06	<0,07	<0,06
FeO	16,97	18,61	12,50	18,05	12,01
MnO	0,23	0,28	0,25	0,31	0,20
MgO	13,25	12,84	16,07	13,12	16,33
CaO	10,55	10,30	12,77	10,55	12,85
Na ₂ O	1,11	1,06	0,09	0,93	0,08
K ₂ O	0,09	0,09	0,05	0,14	0,07
Total	97,20	98,20	97,65	98,04	97,39
cations					
Si	7,1218	7,1773	7,8577	7,2438	7,8806
Ti	0,0653	0,0450	-	0,0261	0,0000
Al IV	0,8782	0,8227	0,1423	0,7562	0,1194
Al VI	0,2146	0,1905	0,0607	0,1817	0,0544
Al	1,0929	1,0132	0,2030	0,9379	0,1738
Cr	-	-	-	-	-
Fe(iii)	0,1992	0,2218	0,0451	0,2306	0,0292
Fe(ii)	1,8998	2,0678	1,4561	1,9875	1,4144
Mn	0,0282	0,0345	0,0302	0,0387	0,0242
Mg	2,9216	2,8165	3,4419	2,8739	3,4985
Ca	1,6713	1,6238	1,9652	1,6616	1,9785
Na	0,3168	0,3030	0,0251	0,2655	0,0226
K	0,0170	0,0173	0,0097	0,0262	0,0125
Total	15,33	15,32	15,03	15,29	15,03
Wo	-	-	-	-	-
En	-	-	-	-	-
Fs	-	-	-	-	-
	magnésio-	magnésio-		magnésio-	
	hornblende	hornblende	actinolite	hornblende	actinolite
Fe#	-	-	-	-	-
Cr#	-	-	-	-	-
Mg#	60,60	57,66	70,27	59,12	71,21

Échantillon : 05-1064 (plagiogranite)

16 (localisation sur carte, appendice A)

	<u>amphibole c1</u>	<u>amphibole c1</u>	<u>amphibole c2</u>	<u>amphibole c2</u>	<u>amphibole c3</u>	<u>amphibole c3</u>
%						
SiO ₂	48,68	56,38	49,07	54,21	52,18	47,37
TiO ₂	0,70	<0,13	0,45	<0,13	<0,13	0,79
Al ₂ O ₃	6,22	0,48	6,03	1,77	3,09	7,24
Cr ₂ O ₃	<0,07	<0,06	<0,07	<0,06	<0,07	<0,06
FeO	18,64	8,34	17,97	13,21	15,48	19,06
MnO	0,34	0,11	0,32	0,15	0,40	0,25
MgO	12,48	19,07	12,90	15,73	14,97	11,70
CaO	10,15	13,13	10,19	12,74	11,02	10,53
Na ₂ O	1,07	0,09	1,05	0,17	0,56	1,22
K ₂ O	0,10	<0,03	0,10	0,08	0,18	0,12
Total	98,39	97,67	98,07	98,07	97,92	98,30
cations						
Si	7,1663	7,9361	7,2183	7,7754	7,5796	7,0084
Ti	0,0769	-	0,0497	-	-	0,0877
Al IV	0,8337	0,0639	0,7817	0,2246	0,4204	0,9916
Al VI	0,2459	0,0151	0,2644	0,0740	0,1087	0,2712
Al	1,0795	0,0790	1,0461	0,2985	0,5291	1,2629
Cr	-	-	-	-	-	-
Fe(iii)	0,1090	0,0123	0,1014	0,0854	0,1138	0,1717
Fe(ii)	2,1857	0,9689	2,1087	1,4992	1,7660	2,1862
Mn	0,0428	0,0132	0,0400	0,0179	0,0492	0,0316
Mg	2,7383	4,0030	2,8290	3,3630	3,2421	2,5801
Ca	1,6003	1,9808	1,6066	1,9573	1,7144	1,6687
Na	0,3045	0,0232	0,2986	0,0470	0,1563	0,3485
K	0,0193	-	0,0178	0,0148	0,0328	0,0221
Total	15,32	15,02	15,32	15,06	15,18	15,37
Wo	-	-	-	-	-	-
En	-	-	-	-	-	-
Fs	-	-	-	-	-	-
	magnésio-		magnésio-		magnésio-	
	hornblende	actinolite	hornblende	actinolite	actinolite	hornblende
Fe#	-	-	-	-	-	-
Cr#	-	-	-	-	-	-
Mg#	0,56	0,81	0,57	0,69	0,65	0,54

	<u>amphibole c3</u>	<u>amphibole c4</u>	<u>amphibole c4</u>	<u>amphibole c4</u>
%				
SiO ₂	54,62	47,72	54,95	51,00
TiO ₂	<0,12	0,54	<0,12	0,14
Al ₂ O ₃	1,56	6,66	0,32	3,52
Cr ₂ O ₃	<0,07	<0,06	<0,06	<0,06
FeO	12,15	18,44	10,35	15,84
MnO	0,14	0,35	0,11	0,40
MgO	16,08	12,52	17,85	14,50
CaO	12,76	9,97	13,10	10,87
Na ₂ O	0,17	1,12	<0,06	0,65
K ₂ O	0,05	0,09	<0,03	0,19
Total	97,56	97,43	96,80	97,16
cations				
Si	7,8439	7,0830	7,8670	7,4893
Ti	-	0,0597	-	0,0159
Al IV	0,1561	0,9170	0,0547	0,5107
Al VI	0,1078	0,2475	-	0,0987
Al	0,2638	1,1645	0,0547	0,6094
Cr	-	-	-	-
Fe(iii)	-	0,2079	0,1866	0,1542
Fe(ii)	1,4585	2,0804	1,0525	1,7908
Mn	0,0164	0,0444	0,0137	0,0502
Mg	3,4430	2,7697	3,8106	3,1754
Ca	1,9625	1,5856	2,0084	1,7095
Na	0,0484	0,3212	0,0144	0,1859
K	0,0088	0,0163	-	0,0348
Total	15,05	15,33	15,01	15,22
Wo	-	-	-	-
En	-	-	-	-
Fs	-	-	-	-
	magnésio-		magnésio-	
	actinolite	hornblende	actinolite	hornblende
Fe#	-	-	-	-
Cr#	-	-	-	-
Mg#	0,70	0,57	0,78	0,64

Échantillon : 04-1328-b (diorite)

8 (localisation sur carte, appendice A)

	<u>amphibole c1</u>	<u>amphibole c1</u>	<u>amphibole c2</u>	<u>amphibole c2</u>	<u>amphibole c2</u>	<u>amphibole c3</u>
%						
SiO ₂	49,41	54,65	55,32	51,44	54,49	54,87
TiO ₂	0,39	0,14	<0,14	<0,14	0,17	<0,13
Al ₂ O ₃	5,42	0,72	0,79	3,07	1,06	0,80
Cr ₂ O ₃	<0,07	<0,07	<0,06	<0,07	<0,06	<0,07
FeO	15,92	12,22	10,60	16,57	11,67	12,03
MnO	0,27	0,07	0,09	0,19	0,09	0,11
MgO	13,78	16,62	17,80	13,47	16,95	16,85
CaO	10,66	12,49	12,74	11,37	12,32	12,53
Na ₂ O	1,33	0,16	0,16	0,78	0,23	0,18
K ₂ O	0,10	<0,03	<0,03	0,12	<0,03	<0,03
Total	97,29	97,10	97,55	97,13	97,02	97,51
cations						
Si	7,2916	7,8772	7,8725	7,6048	7,8456	7,8686
Ti	0,0435	0,0154	-	-	0,0187	-
Al IV	0,7084	0,1228	0,1275	0,3952	0,1544	0,1314
Al VI	0,2342	0,0002	0,0051	0,1392	0,0252	0,0042
Al	0,9426	0,1230	0,1327	0,5343	0,1795	0,1355
Cr	-	-	-	-	-	-
Fe(iii)	-	0,0440	0,0724	-	0,0218	0,0519
Fe(ii)	1,9648	1,4291	1,1888	2,0476	1,3834	1,3906
Mn	0,0334	0,0083	0,0108	0,0237	0,0110	0,0137
Mg	3,0305	3,5718	3,7766	2,9677	3,6375	3,6010
Ca	1,6850	1,9293	1,9428	1,7999	1,9009	1,9255
Na	0,3799	0,0439	0,0439	0,2238	0,0645	0,0506
K	0,0183	-	-	0,0232	-	-
Total	15,39	15,04	15,04	15,23	15,06	15,04
Wo	-	-	-	-	-	-
En	-	-	-	-	-	-
Fs	-	-	-	-	-	-
magnésio-						
hornblende		actinolite	actinolite	actinolite	actinolite	actinolite
Fe#	-	-	-	-	-	-
Cr#	-	-	-	-	-	-
Mg#	0,61	0,71	0,76	0,59	0,72	0,72

%	<u>amphibole c3</u>	<u>amphibole c4</u>
SiO ₂	53,84	55,27
TiO ₂	<0,12	<0,13
Al ₂ O ₃	0,23	0,76
Cr ₂ O ₃	<0,07	<0,06
FeO	14,17	10,51
MnO	0,59	0,08
MgO	14,90	17,71
CaO	12,47	12,88
Na ₂ O	0,15	0,15
K ₂ O	<0,03	<0,03
Total	96,48	97,42
cations		
Si	7,9080	7,8760
Ti	-	-
Al IV	0,0405	0,1240
Al VI	0,0000	0,0035
Al	0,0405	0,1275
Cr	-	-
Fe(iii)	0,0766	0,0678
Fe(ii)	1,6642	1,1847
Mn	0,0738	0,0099
Mg	3,2627	3,7614
Ca	1,9621	1,9656
Na	0,0424	0,0403
K	-	-
Total	15,03	15,03
Wo	-	-
En	-	-
Fs	-	-
	<u>actinolite</u>	<u>actinolite</u>
Fe#	-	-
Cr#	-	-
Mg#	0,66	0,76

Échantillon : 04-1032 (plagiogranite)

15 (localisation sur carte, appendice A)

%	<u>amphibole c1</u>	<u>amphibole c2</u>	<u>amphibole c2</u>	<u>amphibole c2</u>	<u>amphibole c3</u>	<u>amphibole c4</u>
SiO ₂	47,44	47,83	48,09	53,61	47,62	47,58
TiO ₂	0,79	0,79	0,16	0,42	0,93	0,95
Al ₂ O ₃	6,48	6,46	5,74	1,60	6,56	6,83
Cr ₂ O ₃	<0,07	<0,06	<0,06	<0,07	<0,07	<0,06
FeO	18,66	18,85	20,76	15,04	18,09	18,23
MnO	0,24	0,27	0,45	0,25	0,28	0,21
MgO	11,94	12,15	11,10	14,31	12,37	12,40
CaO	10,58	10,72	10,50	12,74	10,65	10,92
Na ₂ O	1,28	1,17	0,93	0,11	1,25	1,30
K ₂ O	0,11	0,11	0,33	0,05	0,11	0,13
Total	97,53	98,35	98,06	98,13	97,86	98,56
cations						
Si	7,0723	7,0598	7,1762	7,7628	7,0539	7,0002
Ti	0,0882	0,0875	0,0180	0,0453	0,1032	0,1046
Al IV	0,9277	0,9402	0,8238	0,2372	0,9461	0,9998
Al VI	0,2102	0,1827	0,1849	0,0363	0,1988	0,1838
Al	1,1379	1,1229	1,0087	0,2736	1,1449	1,1836
Cr	-	-	-	-	-	-
Fe(iii)	0,1500	0,2251	0,2683	0,0706	0,1595	0,2095
Fe(ii)	2,1754	2,1015	2,3218	1,7509	2,0808	2,0335
Mn	0,0307	0,0338	0,0570	0,0302	0,0351	0,0262
Mg	2,6535	2,6727	2,4699	3,0899	2,7316	2,7201
Ca	1,6903	1,6956	1,6785	1,9768	1,6900	1,7209
Na	0,3685	0,3348	0,2699	0,0314	0,3593	0,3714
K	0,0209	0,0215	0,0630	0,0083	0,0212	0,0246
Total	15,39	15,36	15,33	15,04	15,38	15,39
Wo	-	-	-	-	-	-
En	-	-	-	-	-	-
Fs	-	-	-	-	-	-
	magnésio-	magnésio-	magnésio-		magnésio-	magnésio-
	hornblende	hornblende	hornblende	actinolite	hornblende	hornblende
Fe#	-	-	-	-	-	-
Cr#	-	-	-	-	-	-
Mg#	0,55	0,56	0,52	0,64	0,57	0,57

Échantillon : 04-1063 (clinopyroxénite)

12 (localisation sur carte, appendice A)

	<u>amphibole c1</u>	<u>amphibole c2</u>	<u>amphibole c3</u>	<u>amphibole c4</u>	<u>pyroxène c1</u>	<u>pyroxène c2</u>
%						
SiO ₂	50,53	51,23	50,53	51,35	53,11	52,86
TiO ₂	0,57	0,16	0,33	<0,14	<0,13	<0,13
Al ₂ O ₃	5,75	5,09	5,57	4,94	1,36	1,29
Cr ₂ O ₃	0,10	0,10	0,09	0,12	0,10	0,09
FeO	10,48	9,84	9,92	9,76	6,70	6,04
MnO	0,16	0,16	0,14	0,18	0,18	0,17
MgO	17,45	18,12	17,80	18,26	16,76	16,22
CaO	11,79	11,40	11,55	11,36	21,61	22,68
Na ₂ O	1,05	0,81	0,97	0,79	0,15	0,20
K ₂ O	0,07	0,06	0,08	0,05	<0,03	<0,03
Total	97,94	96,97	96,97	96,90	99,99	99,64
cations						
Si	7,1951	7,3171	7,2368	7,3322	1,9572	1,9564
Ti	0,0605	0,0173	0,0352	-	-	-
Al IV	0,8049	0,6829	0,7632	0,6678	0,0428	0,0436
Al VI	0,1603	0,1731	0,1760	0,1632	0,0161	0,0128
Al	0,9652	0,8560	0,9393	0,8310	0,0589	0,0564
Cr	0,0116	0,0110	0,0106	0,0130	0,0029	0,0028
Fe(iii)	0,2091	0,2291	0,2242	0,2421	0,0483	0,0561
Fe(ii)	1,0385	0,9462	0,9642	0,9233	0,1574	0,1300
Mn	0,0188	0,0196	0,0170	0,0223	0,0055	0,0053
Mg	3,7036	3,8591	3,8006	3,8876	0,9207	0,8951
Ca	1,7976	1,7448	1,7722	1,7372	0,8532	0,8994
Na	0,2898	0,2249	0,2682	0,2182	0,0104	0,0141
K	0,0131	0,0104	0,0137	0,0087	-	-
Total	15,30	15,24	15,28	15,22	4,01	4,02
Wo	-	-	-	-	42,76	44,97
En	-	-	-	-	46,14	44,75
Fs	-	-	-	-	10,58	9,57
	magnésio-	magnésio-	magnésio-	magnésio-		
	hornblende	hornblende	hornblende	hornblende	augite	augite
Fe#	-	-	-	-	-	-
Cr#	-	-	-	-	-	-
Mg#	0,78	0,80	0,80	0,81	85,40	87,32

	<u>pyroxène c3</u>	<u>pyroxène c4</u>
%		
SiO ₂	52,88	53,04
TiO ₂	0,14	<0,13
Al ₂ O ₃	1,44	1,02
Cr ₂ O ₃	0,08	0,12
FeO	6,33	7,35
MnO	0,16	0,18
MgO	16,22	15,50
CaO	22,43	22,58
Na ₂ O	0,15	0,19
K ₂ O	<0,03	<0,03
Total	99,83	100,02
cations		
Si	1,9538	1,9659
Ti	0,0039	-
Al IV	0,0462	0,0341
Al VI	0,0165	0,0102
Al	0,0627	0,0443
Cr	0,0022	0,0034
Fe(iii)	0,0456	0,0462
Fe(ii)	0,1493	0,1806
Mn	0,0050	0,0057
Mg	0,8932	0,8565
Ca	0,8878	0,8966
Na	0,0110	0,0137
K	-	-
Total	4,01	4,01
Wo	44,57	44,85
En	44,84	42,84
Fs	10,04	11,63
	augite	augite
Fe#	-	-
Cr#	-	-
Mg#	85,68	82,59

Échantillon : 04-1280-c (pyroxénite)

26 (localisation sur carte, appendice A)

	<u>amphibole c1</u>	<u>amphibole c3</u>	<u>amphibole c5</u>	<u>amphibole c8</u>	<u>pyroxène c2</u>	<u>pyroxène c4</u>
%						
SiO ₂	54,30	54,63	54,14	54,71	53,41	52,60
TiO ₂	<0,13	<0,12	<0,13	<0,13	<0,12	<0,13
Al ₂ O ₃	3,02	3,06	3,15	2,47	1,18	1,66
Cr ₂ O ₃	0,30	0,31	0,64	0,23	0,29	0,50
FeO	5,85	5,53	4,83	4,82	4,28	4,41
MnO	0,12	0,10	0,09	0,08	0,12	0,15
MgO	20,83	21,06	21,21	21,38	17,67	17,49
CaO	11,95	11,88	12,11	11,88	22,77	22,49
Na ₂ O	0,29	0,23	0,27	0,36	0,08	0,09
K ₂ O	0,05	0,04	0,07	0,03	<0,03	<0,03
Total	96,78	96,93	96,57	96,05	99,89	99,44
cations						
Si	7,6123	7,6312	7,5813	7,7009	1,9555	1,9379
Ti	-	-	-	-	-	-
Al IV	0,3877	0,3688	0,4187	0,2991	0,0445	0,0621
Al VI	0,1105	0,1344	0,1005	0,1104	0,0063	0,0097
Al	0,4982	0,5033	0,5192	0,4096	0,0508	0,0719
Cr	0,0329	0,0340	0,0710	0,0250	0,0084	0,0145
Fe(iii)	0,1400	0,1098	0,1474	0,0393	0,0450	0,0638
Fe(ii)	0,5458	0,5360	0,4179	0,5283	0,0855	0,0712
Mn	0,0147	0,0117	0,0107	0,0093	0,0036	0,0048
Mg	4,3527	4,3859	4,4279	4,4870	0,9644	0,9607
Ca	1,7947	1,7775	1,8169	1,7907	0,8933	0,8876
Na	0,0783	0,0631	0,0725	0,0985	0,0055	0,0064
K	0,0088	0,0062	0,0118	0,0061	-	-
Total	15,08	15,06	15,08	15,09	4,01	4,02
Wo	-	-	-	-	44,73	44,50
En	-	-	-	-	48,28	48,16
Fs	-	-	-	-	6,71	7,01
	actinolite	actinolite	trémolite	actinolite	augite	augite
Fe#	-	-	-	-	-	-
Cr#	-	-	-	-	-	-
Mg#	0,89	0,89	0,91	0,89	91,86	93,10

	<u>pyroxène c5</u>	<u>pyroxène c6</u>
%		
SiO ₂	52,52	52,62
TiO ₂	<0,12	<0,13
Al ₂ O ₃	1,72	1,65
Cr ₂ O ₃	0,53	0,51
FeO	4,18	4,15
MnO	0,13	0,14
MgO	17,03	17,24
CaO	23,24	22,57
Na ₂ O	0,07	0,11
K ₂ O	<0,03	<0,03
Total	99,45	98,99

cations		
Si	1,9366	1,9449
Ti	-	-
Al IV	0,0634	0,0551
Al VI	0,0114	0,0169
Al	0,0748	0,0720
Cr	0,0154	0,0148
Fe(iii)	0,0589	0,0471
Fe(ii)	0,0692	0,0806
Mn	0,0039	0,0044
Mg	0,9360	0,9497
Ca	0,9180	0,8935
Na	0,0051	0,0081
K	-	-
Total	4,02	4,02

Wo	46,10	45,05
En	47,01	47,88
Fs	6,63	6,66

	<u>diopside</u>	<u>diopside</u>
Fe#	-	-
Cr#	-	-
Mg#	93,12	92,17

Échantillon : 04-1014 (gabbro)

11 (localisation sur carte, appendice A)

	<u>amphibole c1</u>	<u>pyroxène c1</u>	<u>pyroxène c2</u>	<u>pyroxène c3</u>	<u>pyroxène c4</u>	<u>pyroxène c5</u>
%						
SiO ₂	42,37	52,34	50,55	51,32	50,05	49,70
TiO ₂	1,19	0,17	0,32	0,16	0,22	0,28
Al ₂ O ₃	12,85	2,24	3,67	2,36	3,34	4,32
Cr ₂ O ₃	0,16	<0,07	0,07	<0,06	0,07	0,08
FeO	10,52	6,02	6,62	6,43	8,63	6,63
MnO	0,12	0,17	0,19	0,17	0,19	0,18
MgO	14,84	15,65	14,68	15,57	16,25	15,28
CaO	11,77	23,13	22,59	22,75	19,45	21,65
Na ₂ O	2,32	0,23	0,25	0,21	0,20	0,57
K ₂ O	0,23	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Total	96,37	100,00	98,94	99,01	98,41	98,70
cations						
Si	6,2207	1,9329	1,8934	1,9197	1,8880	1,8663
Ti	0,1312	0,0047	0,0090	0,0045	0,0062	0,0080
Al IV	1,7793	0,0671	0,1066	0,0803	0,1120	0,1337
Al VI	0,4443	0,0304	0,0554	0,0237	0,0365	0,0574
Al	2,2236	0,0975	0,1621	0,1040	0,1485	0,1910
Cr	0,0188	-	0,0020	-	0,0021	0,0025
Fe(iii)	0,3492	0,0639	0,0741	0,0931	0,1123	0,1467
Fe(ii)	0,9422	0,1211	0,1321	0,1064	0,1574	0,0589
Mn	0,0152	0,0054	0,0061	0,0054	0,0060	0,0059
Mg	3,2479	0,8618	0,8200	0,8685	0,9140	0,8553
Ca	1,8512	0,9152	0,9065	0,9116	0,7858	0,8710
Na	0,6610	0,0167	0,0184	0,0153	0,0146	0,0413
K	0,04	-	-	-	-	-
Total	15,70	4,02	4,02	4,03	4,03	4,04
Wo	-	46,12	46,32	45,57	39,48	44,01
En	-	43,43	41,90	43,42	45,93	43,22
Fs	-	9,60	10,84	10,24	13,86	10,69
	pargasite	diopside	diopside	diopside	augite	augite
Fe#	-	-	-	-	-	-
Cr#	-	-	-	-	-	-
Mg#	0,78	87,68	86,13	89,09	85,31	93,56

Échantillon : 04-1061-2 (clinopyroxénite)

13 (localisation sur carte, appendice A)

	<u>amphibole c1</u>	<u>amphibole c2</u>	<u>amphibole c3</u>	<u>amphibole c4</u>	<u>pyroxène c1</u>	<u>pyroxène c2</u>
%						
SiO ₂	49,91	48,55	49,05	48,63	52,96	52,60
TiO ₂	0,34	0,59	0,48	0,37	<0,13	<0,13
Al ₂ O ₃	5,19	6,25	5,81	5,96	0,76	0,32
Cr ₂ O ₃	0,11	<0,07	0,10	0,08	0,09	<0,07
FeO	11,42	11,78	11,56	11,48	6,41	7,42
MnO	0,20	0,16	0,18	0,14	0,20	0,27
MgO	16,75	16,29	16,71	16,85	15,62	14,26
CaO	11,16	11,15	11,28	11,26	23,20	23,68
Na ₂ O	0,89	1,13	1,03	1,07	0,14	0,22
K ₂ O	0,05	0,10	0,10	0,09	<0,03	<0,03
Total	96,02	96,05	96,31	95,93	99,39	98,76
cations						
Si	7,2673	7,0969	7,1322	7,0898	1,9713	1,9844
Ti	0,0367	0,0644	0,0529	0,0402	-	-
Al IV	0,7327	0,9031	0,8678	0,9102	0,0287	0,0142
Al VI	0,1584	0,1734	0,1279	0,1139	0,0046	0,0000
Al	0,8911	1,0765	0,9956	1,0241	0,0333	0,0142
Cr	0,0127	-	0,0117	0,0089	0,0027	-
Fe(iii)	0,2275	0,2574	0,3127	0,3886	0,0456	0,0490
Fe(ii)	1,1630	1,1823	1,0928	1,0110	0,1533	0,1840
Mn	0,0252	0,0202	0,0219	0,0172	0,0062	0,0085
Mg	3,6360	3,5507	3,6224	3,6620	0,8666	0,8019
Ca	1,7406	1,7462	1,7577	1,7582	0,9253	0,9571
Na	0,2515	0,3199	0,2904	0,3018	0,0099	0,0161
K	0,01	0,0181	0,0193	0,0165	-	-
Total	15,26	15,33	15,31	15,32	4,01	4,02
Wo	-	-	-	-	46,11	47,46
En	-	-	-	-	43,18	39,77
Fs	-	-	-	-	10,22	11,97
	magnésio-	magnésio-	magnésio-	magnésio-		
	hornblende	hornblende	hornblende	hornblende	diopside	diopside
Fe#	-	-	-	-	-	-
Cr#	-	-	-	-	-	-
Mg#	0,76	0,75	0,77	0,78	84,97	81,33

	<u>pyroxène c3</u>	<u>pyroxène c4</u>
%		
SiO ₂	51,63	52,28
TiO ₂	0,14	<0,12
Al ₂ O ₃	1,55	1,35
Cr ₂ O ₃	0,10	0,06
FeO	8,86	7,11
MnO	0,19	0,19
MgO	15,06	16,75
CaO	21,48	21,28
Na ₂ O	0,22	0,14
K ₂ O	<0,03	<0,03
Total	99,23	99,21
cations		
Si	1,9414	1,9470
Ti	0,0039	-
Al IV	0,0586	0,0530
Al VI	0,0102	0,0062
Al	0,0689	0,0592
Cr	0,0028	0,0017
Fe(iii)	0,0805	0,0762
Fe(ii)	0,1961	0,1437
Mn	0,0061	0,0060
Mg	0,8442	0,9298
Ca	0,8653	0,8489
Na	0,0162	0,0097
K	-	-
Total	4,02	4,02
Wo	43,09	42,14
En	42,03	46,16
Fs	14,07	11,22
	augite	augite
Fe#	-	-
Cr#	-	-
Mg#	81,15	86,61

Échantillon : 04-1333 (gabbro)

10 (localisation sur carte, appendice A)

	<u>pyroxène c1</u>	<u>pyroxène c2</u>	<u>pyroxène c3</u>	<u>pyroxène c3</u>	<u>pyroxène c4</u>	<u>pyroxène c4</u>
%						
SiO ₂	52,57	50,52	52,59	52,87	53,15	51,97
TiO ₂	0,27	0,26	0,40	0,50	0,36	0,72
Al ₂ O ₃	3,02	4,19	1,59	1,79	1,32	2,86
Cr ₂ O ₃	0,71	0,90	0,40	0,32	0,42	0,54
FeO	5,06	4,44	4,67	4,49	4,53	4,81
MnO	0,14	0,10	0,16	0,11	0,13	0,14
MgO	16,71	17,02	16,56	16,49	16,78	16,73
CaO	21,62	21,46	22,73	23,43	23,28	22,16
Na ₂ O	0,34	0,35	0,27	0,27	0,28	0,33
K ₂ O	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Total	100,43	99,24	99,36	100,27	100,27	100,28
cations						
Si	1,9176	1,8664	1,9430	1,9361	1,9468	1,9028
Ti	0,0074	0,0071	0,0111	0,0137	0,0099	0,0197
Al IV	0,0824	0,1336	0,0570	0,0639	0,0532	0,0972
Al VI	0,0476	0,0488	0,0120	0,0134	0,0039	0,0264
Al	0,1299	0,1824	0,0691	0,0773	0,0571	0,1236
Cr	0,0203	0,0262	0,0118	0,0093	0,0122	0,0155
Fe(iii)	0,0349	0,1043	0,0460	0,0494	0,0558	0,0590
Fe(ii)	0,1190	0,0317	0,0977	0,0874	0,0824	0,0876
Mn	0,0044	0,0033	0,0049	0,0035	0,0041	0,0045
Mg	0,9088	0,9375	0,9119	0,9006	0,9164	0,9133
Ca	0,8451	0,8493	0,8998	0,9193	0,9135	0,8693
Na	0,0238	0,0254	0,0196	0,0194	0,0197	0,0236
K	-	-	-	-	-	-
Total	4,01	4,03	4,01	4,02	4,02	4,02
Wo	43,65	43,52	45,45	46,44	45,86	44,41
En	46,94	48,04	46,06	45,49	46,01	46,66
Fs	8,18	7,14	7,51	7,09	7,14	7,72
	augite	augite	diopside	diopside	diopside	augite
Fe#	-	-	-	-	-	-
Cr#	-	-	-	-	-	-
Mg#	88,42	96,73	90,32	91,15	91,75	91,24

pyroxène c5

%	
SiO ₂	51,86
TiO ₂	0,30
Al ₂ O ₃	3,34
Cr ₂ O ₃	0,96
FeO	4,43
MnO	0,13
MgO	16,49
CaO	21,99
Na ₂ O	0,33
K ₂ O	<0,03
Total	99,83

cations

Si	1,9033
Ti	0,0082
Al IV	0,0967
Al VI	0,0478
Al	0,1445
Cr	0,0279
Fe(iii)	0,0423
Fe(ii)	0,0932
Mn	0,0040
Mg	0,9023
Ca	0,8644
Na	0,0234
K	-
Total	4,01

Wo	44,80
En	46,76
Fs	7,23

augite

Fe#	-
Cr#	-
Mg#	90,64

APPENDICE A

CARTE GÉOLOGIQUE DE LA RÉGION DU LAC BROMPTON

(en pochette)

La carte géologique présentée à l'appendice A a été réalisée à partir de travaux de terrain effectués lors des étés 2004 et 2005. Les sites d'échantillonnage à des fins de géochimie ou de chimie minérale, ainsi que les sites d'intérêt économique visités lors des cheminements sont indiqués sur la carte. Cette carte résulte aussi de la compilation et de la ré-interprétation des données cartographiques de St-Julien (1960, 1961, 1966).

RÉFÉRENCES

- Anonymous. 1972. "Penrose Field Conference: Ophiolites". *Geotimes*, vol. 17, no 12, p. 24-25.
- Arai, S. 1992. "Chemistry of chromian spinel in volcanic rocks as a potential guide to magma chemistry". *Mineralogical Magazine*, vol. 56, p. 173-184.
- Auclair, M., M. Gauthier, J. Trottier, M. Jébrak et F. Chartrand. 1993. "Mineralogy, Geochemistry, and Paragenesis of the Eastern Metals Serpentinite-Associated Ni-Cu-Zn Deposit, Quebec Appalachians". *Economic Geology*, vol. 88, p. 123-138.
- Baines, A. G., M. J. Cheadle, H. J. B. Dick, A. H. Scheirer, B. E. John, N. J. Kusznir et T. Matsumoto. 2003. "Mechanism for generating the anomalous uplift of oceanic core complexes: Atlantis Bank, southwest Indian Ridge". *Geology*, vol. 31, no 12, p. 1105-1108.
- Barnes, S. J., et P. L. Roeder. 2001. "The Range of Spinel Compositions in Terrestrial Mafic and Ultramafic Rocks". *Journal of Petrology*, vol. 42, no 12, p. 2279-2302.
- Bédard, J. H. 1999. "Petrogenesis of Boninites from the Betts Cove Ophiolite, Newfoundland, Canada: Identification of Subducted Source Components". *Journal of Petrology*, vol. 40, no 12, p. 1853-1889.
- Bédard, J. H., K. Lauzière, A. Tremblay et A. Sangster. 1998. "Evidence for forearc seafloor-spreading from the Betts Cove ophiolite, Newfoundland: oceanic crust of boninitic affinity". *Tectonophysics*, vol. 284, p. 233-245.
- Bergmann, H. J., et B. Bourgoin. 1972. "11 ddh logs". Ministère des Ressources naturelles, Québec, GM 28294, 14 p.
- Bergmann, H. J. 1956. "Report on electromagnetic survey". Ministère des Ressources naturelles, Québec, GM 4217-A, 5 p.
- Bernoulli, D. 1985. "Sedimentary fabrics in Alpine ophiolites, South Pennine Arosa, Switzerland". *Geology*, vol. 13, p. 755-758.
- Blackman, D. K., J. A. Karson, D. S. Kelley, J. R. Cann, G. L. Früh-Green, J. S. Gee, S. D. Hurst, B. E. John, J. Morgan, S. L. Nooner, D. K. Ross, T. J. Schroeder et E. A.

- Williams. 2002. "Geology of the Atlantis Massif (Mid-Atlantic Ridge, 30°N): Implications for the evolution of an ultramafic oceanic core complex". *Marine Geophysical Researches*, vol. 23, p. 443-469.
- Blackman, D. K., J. R. Cann, B. Janssen et D. K. Smith. 1998. "Origin of extensional core complexes: Evidence from the Mid-Atlantic Ridge at Atlantis Fracture Zone". *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, no B9, p. 21315-21333.
- Blais, D. 1991. "Petrography and geochemistry of the Bunker Hill sequence, Ayer's Cliff, Quebec Appalachians". Mémoire de maîtrise, Montréal, Université du Québec à Montréal, 54 p.
- Bourque, P.-A., D. Brisebois et M. Malo. 1995. «Gaspé Belt». In *Geology of the Appalachian-Caledonian Orogen in Canada and Greenland, Geology of Canada*, édité par H. Williams, p. 316-351. Geology of Canada, no. 6, Geological Survey of Canada.
- Bradley, D. C. 1983. "Tectonics of the Acadian orogeny in New England and adjacent Canada". *Journal of Geology*, vol. 91, p. 381-400.
- Brown, A. C. 1992. "Sediment-hosted Stratiform Copper Deposits". *Geoscience Canada*, vol. 19, no 3, p. 125-141.
- Brown, A. C. 1989. «Sediment-hosted Stratiform Copper Deposits: Deposit-type Name and Related Terminology». In *Sediment-hosted Stratiform Copper Deposits*, édité par R.W. Boyle, A.C. Brown, C.W. Jefferson, E.C. Jowett et R.V. Kirkham, p. 39-51. Geological Association of Canada, Special Paper 36.
- Buisson, G., et M. Leblanc. 1986. «Gold-bearing listwaenites (carbonatized ultramafic rocks) from ophiolite complexes». In *Metallogeny of basic and ultrabasic rocks*, édité par M.J. Gallagher, R.A. Ixer, C.R. Neary et H.M. Prichard, p. 121-131. London: The Institution of Mining and Metallurgy.
- Candela, P. A., A. G. Wyle et T. M. Burke. 1989. "Genesis of the Ultramafic Rock-Associated Fe-Cu-Co-Zn-Ni Deposits of the Sykesville District, Maryland Piedmont". *Economic Geology*, vol. 84, p. 663-675.
- Cannat, M. 1993. "Emplacement of Mantle Rocks in the Seafloor at Mid-Ocean Ridges". *Journal of Geophysical Research*, vol. 98, no B3, p. 4163-4172.

- Castonguay, S., G. Ruffet, A. Tremblay. 2007. "Dating polyphase deformation across low-grade metamorphic belts: An example based on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ muscovite age constraints from the southern Quebec Appalachians, Canada". *Geological Society of America Bulletin* (sous presse).
- Castonguay, S., G. Ruffet, A. Tremblay et G. Féraud. 2001. "Tectonometamorphic evolution of the southern Quebec Appalachians: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ evidence for Middle Ordovician crustal thickening and Silurian-Early Devonian exhumation of the internal Humber zone". *Geological Society of America Bulletin*, vol. 113, no 1, p. 144-160.
- Cawood, P. A., et G. Suhr. 1992. "Generation and obduction of ophiolites: Constraints from the Bay of Islands Complex, Western Newfoundland". *Tectonics*, vol. 11, no 4, p. 884-897.
- Clague, D. A., C. S. Frankel et J. Eaby. 1985. "The age and origin of felsic intrusions of the Thetford Mines ophiolite, Quebec". *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 22, p. 1257-1261.
- Coleman, R. G., et M. M. Donato. 1979. «Oceanic plagiogranites revisited». In *Trondhjemites, dacites and related rocks*, édité par F. Barker, p. 150-168. New York: Elsevier.
- Coleman, R. G. 1977. *Ophiolites Ancient Oceanic Lithosphere?* Berlin: Springer-Verlag, 219 p.
- Coleman, R. G., et Z. E. Peterman. 1975. "Oceanic plagiogranites". *Journal of Geophysical Research*, vol. 80, no 8, p. 1099-1108.
- Coleman, R. G. 1971. "Plate Tectonic Emplacement of Upper Mantle Peridotites along Continental Edges". *Journal of Geophysical Research*, vol. 76, no 5, p. 1212-1222.
- Cooke, H. C. 1951. "Magog-Weedon, Québec", Commission Géologique du Canada, carte 994A.
- Cousineau, P. A., et P. St-Julien. 1994. "Stratigraphie et paléogéographie d'un bassin d'avant-arc ordovicien, Estrie-Beauce, Appalaches du Québec". *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 31, p. 435-446.
- Cousineau, P. A., et A. Tremblay. 1993. «Acadian deformation in the southwestern Quebec Appalachians». In *The Acadian Orogeny: Recent Studies in New England, Maritime*

- Canada, and the Autochthonous Foreland*, édité par David C. Roy, et James W. Skehan, p. 85-99. Geological Society of America, Special Paper 275.
- Cousineau, P. A., et P. St-Julien. 1992. "The Saint-Daniel Mélange: Evolution of an accretionary complex in the Dunnage terrane of the Québec Appalachians". *Tectonics*, vol. 11, p. 898-909.
- Cousineau, P. A. 1991. "The Rivière des Plantes ophiolitic mélange; tectonic setting and mélange formation in Québec Appalachians". *Journal of Geology*, vol. 99, p. 81-96.
- Cousineau, P. A. 1990. "Le Groupe de Caldwell et le domaine océanique entre St-Joseph-de-Beauce et Sainte-Sabine". Ministère des Ressources naturelles, Québec, MM 87-02, 165 p.
- Crawford, A. J., L. Beccaluva et G. Serri. 1981. "Tectono-magmatic evolution of the West Philippine-Mariana region and the origin of boninites". *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 54, p. 346-356.
- Daoust, C., S. De Souza et A. Tremblay. 2006. Sub-ophiolitic metamorphic rocks of the Lac-Brompton area: a newly-recognized metamorphic sole in southern Québec. *Geological Society of America*, Abstracts with Programs, vol. 38, no. 2, p. 92.
- Daoust, C., S. De Souza, A. Tremblay et M. Gauthier. 2005. The Lac-Brompton ophiolitic complex: stratigraphy and structure of a newly-recognized ophiolite in the southern Québec Appalachians, Canada. *Geological Society of America*, Abstracts with Programs, vol. 37, no. 1, p. 72.
- David, J., et R. Marquis. 1994. "Géochronologie U-Pb dans les Appalaches du Québec: application aux roches de la zone de Dunnage". *Revue géologique du Québec*, vol. 1, p. 16-20.
- de Romer, H. S. 1980. "Région de Baie Fitch-Lac Massawippi". Ministère de l'Énergie et des Ressources, RG 196, 59 p.
- De Souza, S., C. Daoust, A. Tremblay et M. Gauthier. 2006. The Lac Brompton Ophiolite Complex: geochemistry, stratigraphy and implications for the southern Québec ophiolite belt, Canada. *Geological Society of America*, Abstracts with Programs, vol. 38, no. 2, p. 10.

- Dick, H. J. B., et T. Bullen. 1984. "Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas". *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 86, p. 54-76.
- Dilek, Y., et M. Delaloye. 1992. "Structure of the Kizildag ophiolite, a slow-spread Cretaceous ridge segment north of the Arabian promontory". *Geology*, vol. 20, p. 19-22.
- Dilek, Y., et C. A. Eddy. 1992. "The Troodos (Cyprus) and Kizildag (S. Turkey) Ophiolites as Structural Models for Slow-Spreading Ridge Segments". *The Journal of Geology*, vol. 100, p. 305-322.
- Doolan, B. L., M. H. Gale, P. N. Gale et R. S. Hoar. 1982. «Geology of the Québec Reentrant: possible constraints from early rifts and the Vermont-Québec Serpentinite Belt». In *Major structural zones and faults of the Northern Appalachians*, édité par Pierre St-Julien, et J. Béland, p. 187-216. Geological Association of Canada, Special Paper 24.
- Dunning, G. R., et R. B. Pedersen. 1988. "U/Pb ages of ophiolites and arc-related plutons of the Norwegian Caledonides: implications for the development of Iapetus". *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 98, p. 13-23.
- Dunning, G. R., T. E. Krogh et R. B. Pedersen. 1986. U/Pb zircon ages of Appalachian-Caledonian ophiolites. *Terra Cognita*, vol. 6, p. L51.
- Durand, C., V. Ballu, P. Gente et J. Dubois. 1996. "Horst and graben structures on the flanks of the Mid-Atlantic Ridge in the MARK area (23°22'N): Submersible observations". *Tectonophysics*, vol. 265, p. 275-297.
- Ellam, R. M., et C. J. Hawkesworth. 1988. "Elemental and isotopic variations in subduction related basalts: evidence for a three component model". *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 98, p. 72-80.
- Elthon, D. 1991. "Geochemical evidence for formation of the Bay of Islands ophiolite above a subduction zone". *Nature*, vol. 354, p. 140-143.
- Fouquet, Y., J.-L. Charlou et F. J. A. S. Barriga. 2002. Modern seafloor hydrothermal deposits hosted in ultramafic rocks. *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, vol. 34, no. 6, p. 444.

- Fouquet, Y. 1997. "Geological Setting and Composition of Hydrothermal Sulfide Deposits Along the Mid-Atlantic Ridge. Volcanic Control Versus Tectonic Control of Sulfide Mineralisation". *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, vol. 78, no 46, p. 832.
- Fryer, P., M. Mottl, L. Johnson, J. Haggerty, S. Phipps et H. Maekawa. 1995. «Serpentine Bodies in the Forearcs of Western Pacific Convergent Margins: Origin and Associated fluids». In *Active Margins and Marginal Basins of the Western Pacific*, édité par Brian Taylor, et James Natland, p. 259-279. American Geophysical Union, Geophysical Monograph 88.
- Gaal, G., et J. Parkikinen. 1993. «Early Proterozoic Ophiolite-hosted Copper-Zinc-Cobalt Deposits of the Outokumpu Type». In *Mineral Deposit Modeling*, édité par R.V. Kirkham, W.D. Sinclair, R.I. Thorpe et J.M. Duke, p. 335-341. Geological Association of Canada, Special Paper 40.
- Gauthier, M. 1986a. "Synthèse métallogénique de l'Estrée et de la Beauce (Secteur centre-ouest), annexe no. 1, fiches descriptives des gîtes métallifères repérés sur le terrain en 1985". Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, MB 86-47, 145 p.
- Gauthier, M. 1986b. "Synthèse métallogénique de l'Estrée et de la Beauce (Secteur centre-ouest)". Ministère des Ressources naturelles, Québec, MB-86-46, 101 p.
- Gribble, R. F., R. J. Stern, S. Newman, S. H. Bloomer et T. O'Hearn. 1998. "Chemical and Isotopic Composition of Lavas from the Northern Mariana Trough: Implications for Magmagenesis in Back-arc Basins". *Journal of Petrology*, vol. 39, no 1, p. 125-154.
- Griffiths, S., J. Lacasse et F. Spertini. 1966. "26 ddh logs, GM 18472". Canadian Johns-Manville Co. Ltd., 56 p.
- Harnois, L., J. Trottier et M. Morency. 1990. "Rare earth element geochemistry of Thetford Mines ophiolite complex, Northern Appalachians, Canada". *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 105, p. 433-445.
- Harnois, L., et M. Morency. 1989. "Geochemistry of Mount Orford ophiolite complex, Northern Appalachians, Canada". *Chemical Geology*, vol. 77, p. 133-147.
- Hawkins, J. W. 2003. «Geology of supra-subduction zones - Implications for the origin of ophiolites». In *Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought*, édité par

- Yildirim Dilek, et Sally Newcomb, p. 227-268. Geological Society of America, Special Paper 373.
- Hawkins, J. W., S. H. Bloomer, C. Evans et J. T. Melchior. 1984. "Evolution of intra-oceanic arc-trench systems". *Tectonophysics*, vol. 102, p. 175-205.
- Hébert, R., et J. H. Bédard. 2000. "Les ophiolites d'avant-arc et leur potentiel minéral". *Chronique de la recherche minière*, no 539, p. 101-117.
- Hébert, R., et R. Laurent. 1989. "Mineral Chemistry of ultramafic and mafic plutonic rocks of the Appalachian ophiolites, Québec, Canada". *Chemical Geology*, vol. 77, p. 265-285.
- Hickey, R. L., et F. A. Frey. 1982. "Geochemical characteristics of boninite series volcanics: implication for their source". *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 46, p. 2099-2115.
- Humphris, S., et G. Thompson. 1978a. "Hydrothermal alteration of oceanic basalts by seawater". *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 42, p. 107-125.
- Humphris, S., et G. Thompson. 1978b. "Trace element mobility during hydrothermal alteration of oceanic basalts". *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 42, p. 127-136.
- Huot, F., R. Hébert et B. Turcotte. 2002. "A multistage magmatic history for the genesis of the Orford ophiolite (Quebec, Canada): a study of the Mont Chagnon massif". *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 39, p. 1201-1217.
- Husson, B. 1975. "Journal des sondages". Ministère des Ressources naturelles, Québec, GM 32934, 85 p.
- Ishikawa, T., K. Nagaishi et S. Umino. 2002. "Boninitic volcanism in the Oman Ophiolite: Implications for thermal condition during transition from spreading ridge to arc". *Geology*, vol. 30, no 10, p. 899-902.
- Jenner, G. A., G. R. Dunning, J. Malpas, M. Brown et T. Brace. 1991. "Bay of Islands and Little Port complexes, revisited: age, geochemical and isotopic evidence confirm suprasubduction-zone origin". *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 28, p. 1635-1652.
- Juteau, T., et R. Maury. 1999. *Géologie de la croûte océanique*. Paris: Dunod, 367 p.

- Kelley, D. S., J. A. Karson, G. L. Früh-Green, D. R. Yoerger, T. M. Shank, D. A. Butterfield, J. M. Hayes, M. O. Schrenk, E. J. Olson, G. Proskurowski, M. Jakuba, A. Bradley, B. Larson, K. Ludwig, D. Glickson, K. Buckman, A. S. Bradley, W. J. Brazelton, K. Roe, M. J. Elend, A. Delacour, S. M. Bernasconi, M. D. Lilley, J. A. Baross, R. E. Summons et S. P. Sylva. 2005. "A Serpentinite-Hosted Ecosystem: The Lost City Hydrothermal Field". *Science*, vol. 307, p. 1428-1434.
- Kim, J., R. Coish, M. Evans et G. Dick. 2003. "Supra-subduction zone extensional magmatism in Vermont and adjacent Quebec: Implications for early Paleozoic Appalachian tectonics". *Geological Society of America Bulletin*, vol. 115, no 12, p. 1552-1569.
- Kim, J., et R. D. Jacobi. 2002. "Boninites: characteristics and tectonic constraints, northeastern Appalachians". *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 27, p. 109-147.
- Kirkham, R. V. 1989. «Distribution, Settings, and Genesis of Sediment-hosted Stratiform Copper Deposits». In *Sediment-hosted Stratiform Copper Deposits*, édité par R.W. Boyle, A.C. Brown, C.W. Jefferson et R.V. Kirkham, p. 3-38. Geological Association of Canada, Special Paper 36.
- Lagabriele, Y., et M. Lemoine. 1997. "Alpine, Corsican and Apennine ophiolites: the slow-spreading ridge model". *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, vol. 325, p. 909-920.
- Lamothe, D. 1981. "Région du Mont Sugar Loaf: rapport intérimaire". Ministère des Ressources naturelles, Québec, DPV-839, 12 p.
- Lamothe, D. 1978. "Analyse structurale du mélange ophiolitique du lac Montjoie". Mémoire de maîtrise, Québec, Université Laval, 67 p.
- Laurent, R., et R. Hébert. 1989. "The volcanic and intrusive rocks of the Québec Appalachian ophiolites (Canada) and their island-arc setting". *Chemical Geology*, vol. 77, p. 287-302.
- Laurent, R., M. F. Taner et J. Bertrand. 1984. "Mise en place et pétrologie du granite associé au complexe ophiolitique de Thetford Mines, Québec". *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 21, p. 1114-1125.

- Laurent, R. 1977. «Ophiolites from the northern Appalachians of Quebec». In *North American Ophiolites*, édité par Robert Coleman, G., et W.P. Irwin, p. 25-40. State of Oregon department of geology and mineral industries.
- Laurent, R. 1975. "Occurrences and Origin of the Ophiolites of Southern Quebec, Northern Appalachians". *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 12, p. 443-455.
- Lavoie, D., et P. Cousineau. 1995. "Ordovician ophiocalcites of southern Quebec Appalachians: a proposed early seafloor tectonosedimentary and hydrothermal origin". *Journal of Sedimentary Research*, vol. A65, no 2, p. 337-347.
- Le Roex, A. P., H. J. B. Dick, A. M. Reid, F. A. Frey, A. J. Erland et S. R. Hart. 1985. "Petrology and geochemistry of basalts from the American-Antarctic Ridge, Southern Ocean: implications for the westward influence of the Bouvet mantle plume". *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 90, p. 367-380.
- Leat, P. T., R. A. Livermore, I. L. Millar et J. A. Pearce. 2000. "Magma supply in Back-arc Spreading Centre Segment E2, East Scotia Ridge". *Journal of Petrology*, vol. 41, no 6, p. 845-866.
- Loukola-Ruskeeniemi, K. 1999. "Origin of Black Shales and the Serpentinite-Associated Cu-Zn-Co Ores at Outokumpu, Finland". *Economic Geology*, vol. 94, p. 1007-1028.
- Low, J. H. 1952a. "Diamond drill record". Ministère des Ressources naturelles, Québec, GM 2411, 24 p.
- Low, J. H. 1952b. "Report on geomagnetic and geological surveys of the McLeod-Plow property". Ministère des Ressources naturelles, Québec, GM 1974, 16 p.
- Macdonald, K. C. 1982. "Mid-ocean ridges: Fines Scale Tectonic, Volcanic and Hydrothermal Processes Within the Plate Boundary Zone". *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, vol. 10, p. 155-190.
- Macleod, C. J., J. Escartin, D. Banerji, C. Banks, M. Gleeson, D. H. B. Irving, R. M. Lilly, A. M. McCaig, Y. Niu, S. Allerton et D. K. Smith. 2002. "Direct geological evidence for oceanic detachment faulting: The Mid-Atlantic Ridge, 15°45'N". *Geology*, vol. 30, no 10, p. 879-882.
- McCulloch, M. T., et J. A. Gamble. 1991. "Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism". *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 102, p. 358-374.

- Mélançon, B., R. Hébert, R. Laurent et J. Dostal. 1997. "Petrological and geochemical characteristics of the Bolton Igneous Goup, southern Québec Appalachians". *American Journal of Science*, vol. 297, p. 527-549.
- Menzies, M., D. Blanchard et J. Jacobs. 1977. "Rare earth and trace element geochemistry of metabasalts from the Point Sal ophiolite, California". *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 37, p. 203-215.
- Miyashiro, A. 1973. "The Troodos ophiolites was probably formed in an island arc". *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 19, p. 218-224.
- Moreau, A. 1990. "Évaluation du potentiel en métaux précieux du gîte de cuivre Brompton, GM 50408". Groupe Conseil DOZ inc., 20 p.
- Murphy, P. J., et G. Meyer. 1998. "A gold-copper association in ultramafic-hosted hydrothermal sulfides from the Mid-Atlantic Ridge". *Economic Geology*, vol. 93, p. 1076-1083.
- Mutter, J., C., et J. A. Karson. 1992. "Structural Processes at Slow-Spreading Ridges". *Science*, vol. 257, p. 627-634.
- Nicolas, A., F. Boudier et A. Meshi. 1999. "Slow spreading accretion and mantle denudation in the Mirdita ophiolite (Albania)". *Journal of Geophysical Research*, vol. 104, no B7, p. 15155-15167.
- Nicolas, A. 1989. *Structures of ophiolites and dynamics of oceanic lithosphere*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 367 p.
- Nimis, P., S. G. Tesalina, P. Omenetto, P. Tartarotti et C. Lerouge. 2004. "Phyllosilicate minerals in the hydrothermal mafic-ultramafic-hosted massive-sulfide deposit of Ivanovka (southern Urals): comparison with modern ocean seafloor analogues". *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 147, p. 363-383.
- Nooner, S. L., G. S. Sasagawa, D. K. Blackman et M. A. Zumberge. 2003. "Structure of oceanic core complexes: Constraints from seafloor gravity measurements made at the Atlantis Massif". *Geophysical Research Letters*, vol. 30, no 8.
- Olive, V., R. Hébert et M. Loubet. 1997. "Isotopic and trace element constraints on the genesis of a boninitic sequence in the Thetford Mines ophiolitic complex, Quebec, Canada". *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 34, p. 1258-1271.

- Oshin, I. O., et J. H. Crocket. 1986. "The geochemistry and petrogenesis of ophiolitic volcanic rocks from Lac de l'Est, Thetford Mines Complex, Quebec, Canada". *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 23, p. 202-213.
- Pagé, P., J. H. Bédard, J.M. Schroetter, A. Tremblay. 2006. "Mantle petrology and mineralogy of the Thetford Mines Ophiolitic Complex". *Lithos* (sous presse).
- Pearce, J. A. 2003. «Supra-subduction zone ophiolites: The search for modern analogues». In *Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought*, édité par Yildirim Dilek, et Sally Newcomb, p. 269-293. Geological Society of America, Special Paper 373.
- Pearce, J. A., S. R. van der Laan, R. J. Arculus, B. J. Murton, T. Ishii, D. W. Peate et I. J. Parkinson. 1992. «Boninite and harzburgite from Leg 125 (Bonin-Mariana forearc): a case study of magma genesis during the initial stages of subduction». In *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, édité par Patricia Fryer, Julian A. Pearce et L.B. Stokking, et al., p. 623-659.
- Pearce, J. A., S. J. Lippard et S. Roberts. 1984. «Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites». In *Marginal Basin Geology*, édité par B.P. Kokelaar, et M.F. Howells, p. 77-94. London: Geological Society, Special Publication 16.
- Pearce, J. A., N. B. W. Harris et A. G. Tindle. 1984. "Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks". *Journal of Petrology*, vol. 25, p. 956-983.
- Pearce, J. A. 1982. «Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries». In *Andesites*, édité par R.S. Thorpe, p. 525-548. New York: Wiley.
- Pearce, J. A., et M. J. Norry. 1979. "Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y and Nb Variations in Volcanic Rocks". *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 69, p. 33-47.
- Peltola, E. 1978. "Origin of Precambrian Copper Sulfides of the Outokumpu District, Finland". *Economic Geology*, vol. 73, p. 461-477.
- Pinet, N., et A. Tremblay. 1995a. "Tectonic evolution of the Quebec-Maine Appalachians: from oceanic spreading to obduction and collision in the northern Appalachians". *American Journal of Science*, vol. 295, p. 173-200.

- Pinet, N., et A. Tremblay. 1995b. "Is the Taconian orogeny of southern Quebec the result of an Oman-type obduction?" *Geology*, vol. 23, no 2, p. 121-124.
- Ramsay, J. G. 1967. *Folding and fracturing of rocks*. London: McGraw-Hill, 567 p.
- Ranero, C., et T. Reston. 1999. "Detachment faulting at ocean core complexes". *Geology*, vol. 27, no 11, p. 983-986.
- Rodrigue, G. 1979. "Étude pétrologique des roches ophiolitiques du Mont-Orford". Mémoire de maîtrise, Québec, Université Laval, 169 p.
- Schroetter, J.-M., A. Tremblay, J. H. Bédard et M. E. Villeneuve. 2006. "Syncollisional basin development in the Appalachian orogen - The Saint-Daniel Mélange, southern Québec, Canada". *Geological Society of America Bulletin*, vol. 118, p. 109-125.
- Schroetter, J.-M., A. Tremblay et J. H. Bédard. 2005. "Structural evolution of the Thetford Mines Ophiolite Complex, Canada: Implications for the southern Québec ophiolitic belt". *Tectonics*, vol. 24, TC 2099, doi: 10.1019/2005TC001799.
- Schroetter, J.-M. 2004. "Caractérisation structurale et stratigraphique du complexe ophiolitique de Thetford Mines". Thèse de doctorat, Québec, INRS Eau, Terre et environnement, 254 p.
- Schroetter, J.-M., P. Pagé, J. H. Bédard, A. Tremblay et V. Bécu. 2003. «Forearc extension and sea-floor spreading in the Thetford Mines Ophiolite Complex». In *Ophiolites in earth history*, édité par Y. Dilek, et P.T. Robinson, p. 231-251. Geological Society, Special Paper 218.
- Schweller, W. J., D. E. Karig et S. B. Bachman. 1983. «Original Setting and Emplacement History of the Zambales Ophiolite, Luzon, Phillipines, From Stratigraphic Evidence». In *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands: Part 2*, édité par Dennis E. Hayes, p. 124-138. American Geophysical Union, Geophysical Monograph 27.
- Shervais, J. W. 1982. "Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas". *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 59, p. 101-118.
- St-Julien, P., et C. Hubert. 1975. "Evolution of the Taconian orogen in the Quebec Appalachians". *American Journal of Science*, vol. 275-A, p. 337-362.
- St-Julien, P. 1966. "Région d'Orford-Sherbrooke", Ministère des Ressources naturelles, Québec, carte 1619.

- St-Julien, P. 1961. "Rapport préliminaire sur la région du lac Montjoie". Ministère des Ressources naturelles, Québec, RP 464, 14 p.
- St-Julien, P. 1960. "Rapport préliminaire sur la région du lac Fraser". Ministère des Ressources naturelles, Québec, RP 439, 13 p.
- Stern, R., et S. H. Bloomer. 1992. "Subduction zone infancy: Examples from the Eocene Izu-Bonin-Mariana and Jurassic California arcs". *Geological Society of America Bulletin*, vol. 104, p. 1621-1636.
- Stern, R. J., J. Morris, S. H. Bloomer et J. W. Hawkins. 1991. "The source of the subduction component in convergent margin magmas: Trace element and radiogenic isotope evidence from Eocene boninites, Mariana forearc". *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 55, p. 1467-1481.
- Sun, S. S., et W. F. McDonough. 1989. «Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes». In *Magmatism in the Ocean Basins* édité par A.D. Saunders, et M.J. Norry, p. 313-345. Geological Society, Special Publication 42.
- Tatsumi, Y., et S. Maruyama. 1989. «Boninites and high-Mg andesites: tectonics and petrogenesis». In *Boninites*, édité par A.J. Crawford, p. 50-71. London: Unwin Hyman.
- Tatsumi, Y. 1989. "Migration of fluid phases and genesis of basaltic magmas in subduction zones". *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, p. 4697-4707.
- Taylor, R. N., R. W. Nesbitt, V. Phillipe, R. S. Harmon, B. Auvray et I. W. Croudace. 1994. "Mineralogy, Chemistry, and Genesis of the Boninite Series Volcanics, Chichijima, Bonin Islands, Japan". *Journal of Petrology*, vol. 35, p. 577-617.
- Tessalina, S. G., P. Nimis, T. Augé et V. V. Zaykov. 2003. "Origin of chromite in mafic-ultramafic-hosted hydrothermal massive sulfides from the Main Uralian Fault, South Urals, Russia". *Lithos*, vol. 70, p. 39-59.
- Tessalina, S. G., V. V. Zaykov, J.-J. Orgeval, T. Augé et P. Omenetto. 2001. «Mafic-ultramafic hosted massive sulphide deposits in Southern Urals (Russia)». In *Mineral Deposits at the Beginning of the 21st Century*, édité par Adam Piestrzynski, Stanislaw Speczik, Jan Pasava, Maria Sass-Gustkiewicz et David L. Leach, p. 353-356. Lisse: Swets and Zeitlinger Publishers.

- Thériault, G. 1976. "Rapport géophysique, projet Brompton". Ministère des Ressources naturelles, Québec, GM 32933, 4 p.
- Tremblay, A., et J. H. Bédard. 2006. Statigraphie, structure et corrélations régionales de la section crustale des ophiolites appalachiennes du Sud du Québec. *Geological Association of Canada - Mineralogical Association of Canada, Field Trip Guidebook B3*.
- Tremblay, A., A. Meshi, P. Pagé et J. H. Bédard. 2006. Comparisons between southern Quebec and Albanian ophiolites: Implications for the depositional and tectonic evolution of Iapetan oceanic crust. *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, vol. 38, no. 2, p. 9.
- Tremblay, A., et N. Pinet. 2005. "Diachronous supracrustal extension in an intraplate setting and the origin of the Connecticut Valley-Gaspé and Merrimack troughs, northern Appalachians". *Geological Magazine*, vol. 142, no 1, p. 7-22.
- Tremblay, A., et S. Castonguay. 2002. "Structural evolution of the Laurentian margin revisited (southern Quebec Appalachians): Implications for the Salinian orogeny and successor basins". *Geology*, vol. 30, no 1, p. 79-82.
- Tremblay, A., G. Ruffet et S. Castonguay. 2000. "Acadian metamorphism in the Dunnage zone of southern Québec, northern Appalachians: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ evidence for collision diachronism". *Geological Society of America Bulletin*, vol. 112, no 1, p. 136-146.
- Tremblay, A., M. Malo et P. St-Julien. 1995. «Dunnage Zone-Quebec». In *Geology of the Appalachian-Caledonian Orogen in Canada and Greenland*, édité par Harold Williams, p. 179-197. *Geology of Canada*, no. 6, Geological Survey of Canada.
- Tremblay, A., et N. Pinet. 1994. "Distribution and characteristics of Taconian and Acadian deformation, southern Québec Appalachians". *Geological Society of America Bulletin*, vol. 106, p. 1172-1181.
- Tremblay, A. 1992. "Tectonic and accretionary history of Taconian oceanic rocks of the Quebec Appalachians". *American Journal of Science*, vol. 292, p. 229-252.
- Tremblay, A., et M. Malo. 1991. "Significance of brittle and plastic fabrics within the Massawippi Lake fault zone, southern Canadian Appalachians ". *Journal of Structural Geology*, vol. 13, no 9, p. 1013-1023.

- Tremblay, A. 1990. "Géologie de la région d'Ayer's Cliff (partie est)". Ministère des Ressources naturelles, Québec, MB 90-30, 95 p.
- Tremblay, A., et P. St-Julien. 1990. "Structural style and evolution of a segment of the Dunnage Zone from the Quebec Appalachians and its tectonic implications". *Geological Society of America Bulletin*, vol. 102, p. 1218-1229.
- Tremblay, A. 1989. "Le Complexe d'Ascot des Appalaches du sud du Québec: pétrologie et géochimie". *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 26, p. 2407-2420.
- Tucholke, B. E., J. Lin et M. C. Kleinrock. 1998. "Megamullions and mullion structure defining oceanic metamorphic core complexes on the Mid-Atlantic Ridge". *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, no B5, p. 9857-9866.
- Tucholke, B. E., et J. Lin. 1994. "A geological model for the structure of ridge segments in slow spreading ocean crust". *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, no B6, p. 11937-11958.
- Tucholke, B. E. 1992. "Massive submarine rockslide in the rift-valley wall of the Mid-Atlantic Ridge". *Geology*, vol. 20, no 2, p. 129-132.
- Vallée, M. 1987. "Évaluation des réserves, projet Brompton". Ministère des Ressources naturelles, Québec, GM 49121, 83 p.
- Vallée, M. 1977. "Rapport final, campagne d'exploration 1974, 1975, 1976, Projet Brompton, GM 32932". Ministère des Ressources naturelles, Québec, GM 32932, 42 p.
- van Staal, C. R., J. F. Dewey, C. Mac Niocaill et W. S. McKerrow. 1998. «The tectonic evolution of the Northern Appalachians and British Caledonides: history of a complex, west and southwest Pacific-type segment of Iapetus». In *Lyell: The past is the key to the present*, édité par D.J. Blundell, et A.C. Scott, p. 199-242. Geological Society, Special Publication 143.
- Vincent, P. 2004. "Rapport géologique Projet Orford-Constellar". Ministère des Ressources naturelles, Québec, GM 60979, 61 p.
- Walker, T. R. 1989. «Application of Diagenetic Alterations in Redbeds to the Origin of Copper in Stratiform Copper Deposits». In *Sediments-hosted Stratiform Copper Deposits*, édité par R.W. Boyle, A.C. Brown, C.W. Jefferson, E.C. Jowett et R.V. Kirkham, p. 85-96. Geological Association of Canada, Special Paper 36.
- Wedepohl, K. H. 1969. *Handbook of Geochemistry*. New York: Springer-Verlag.

- Whitehead, J., G. R. Dunning et J. G. Spray. 2000. "U-Pb geochronology and origin of granitoid rocks in the Thetford Mines ophiolite, Canadian Appalachians". *Geological Society of America Bulletin*, vol. 112, no 6, p. 915-928.
- Whitehead, J., P. H. Reynolds et J. G. Spray. 1995. "The sub-ophiolite metamorphic rocks of the Québec Appalachians". *Journal of Geodynamics*, vol. 19, p. 325-350.
- Williams, H., et P. St-Julien. 1982. «The Baie Verte-Brompton Line: Early Paleozoic continent-ocean interface in the Canadian Appalachians». In *Major Structural Zones and Faults of the Northern Appalachians*, édité par Pierre St-Julien, et J. Béland, p. 178-206. Geological Association of Canada, Special Paper 24.
- Williams, H. 1979. "Appalachian orogen in Canada". *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 16, p. 792-808.
- You, C.-F., P. R. Castillo, J. M. Gieskes, L. H. Chan et A. J. Spivack. 1996. "Trace element behavior in hydrothermal experiments: Implications for fluid processes at shallow depths in subduction zones". *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 140, p. 41-52.